LES

RAYONS X

ET LA

PHOTOGRAPHIE A TRAVERS LES CORPS OPAQUES.

Ouvrages du même Auteur :

Traité pratique de la Thermométrie de précision. Grand in-8, avec 45 figures et 4 planches sur cuivre; 1889 .... 12 fr.

Unités et étalons. Petit in-8, avec figures; 1893.
Broché............ 2 fr. 50 c. — Cartonné................. 3 fr.

LES RADIATIONS NOUVELLES.

LES

RAYONS X

ET LA

PHOTOGRAPHIE A TRAVERS LES CORPS OPAQUES,

PAR

Ch.-Ed. GUILLAUME.
DOCTEUR ÈS SCIENCES,
ADJOINT AU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES.

DEUXIÈME ÉDITION



PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES,
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1896

AVERTISSEMENT DE LA DEUXIÈME ÉDITION.

Au moment où parut la première édition de cet Ouvrage, la théorie du phénomène découvert par M. Röntgen semblait assez nette, et l'on pouvait espérer qu'elle achèverait de s'éclaircir à bref délai.

Mais la Science est coutumière de l'oscillation; après le premier moment de surprise où les plus habiles avouaient leur impuissance à comprendre les nouveaux phénomènes, est venue la période pendant laquelle tout semblait s'expliquer. Nous aurions plutôt, aujourd'hui, une légère tendance à la confusion. Il ne me paraît pas moins utile d'exposer encore la théorie qui semblait si évidente il y a quelques semaines, mais j'avouerai que mes convictions dans sa simplicité sont moins absolues.

Si la théorie a peu progressé, en revanche la technique expérimentale a marché, depuis un mois, à pas de géant. Tandis qu'au début la photographie des os de la main exigeait une pose d'une heure, on a réussi, par deux étapes successives, à réduire le temps de pose à une minute, puis à deux ou trois secondes. C'est l'instantané dans la Photographie à travers les corps opaques.

Les modifications de cette deuxième édition portent particulièrement sur les perfectionnements qui ont conduit à ce résultat.

Avril 1896.

PRÉFACE DE LA PREMIÈRE ÉDITION.

La merveilleuse découverte du professeur Röntgen, dont on a tant parlé depuis quelque temps, donne la sanction d'une application pratique à un important ensemble de recherches commencées il y a plus d'un quart de siècle, et autour desquelles on s'est livré, depuis quelques années surtout, d'homériques combats. L'interprétation toute matérielle donnée par M. Crookes des phénomènes découverts par Hittorf devint rapidement populaire; pour la première fois, la théorie cinétique des gaz était prise sur le fait, dans une de ses conséquences qui semblait évidente. Cependant, la critique ne se fit pas attendre; M. Goldstein, connu déjà par de belles recherches sur le phénomène cathodique, combattit les idées de M. Crookes par la théorie cinétique elle-même, et donna des arguments, en apparence irréfutables, contre l'idée d'un bombardement moléculaire. Et, malgré tout, cette idée s'appliquait si bien à une partie du phénomène, il était si difficile de la remplacer, que le bombardement survécut à toutes les impossibilités.

Pourtant, les attaques venaient de haut; l'illustre et regretté Hertz, MM. E. Wiedemann et H. Ebert, M. Jaumann, surtout M. Lenard, amoncelèrent les difficultés autour de la théorie du bombardement, que défendirent des champions tels que lord Kelvin, le professeur J.-J. Thomson et le professeur Fitzgerald. Il y eut, autour de cette question, comme

une lutte nationale, entre d'éminents représentants des pays où les deux opinions possibles concernant le phénomène avaient vu le jour. C'est surtout après les magnifiques recherches de M. Lenard, véritable précurseur de M. Röntgen, que la lutte s'anima. Le jeune physicien, alors préparateur de Hertz, avait vu le double phénomène dans le tube et hors du tube. Il l'avait scindé par l'expérience. Il aurait précédé M. Röntgen dans les applications, si la séparation s'était faite aussi dans son esprit.

L'idée qui semble s'imposer aujourd'hui, c'est que le phénomène se compose de deux parties absolument distinctes ; l'une est une conséquence de l'autre, mais elles sont essentiellement différentes de leur nature ; c'est seulement depuis que cette idée s'est fait jour que l'on entrevoit la possibilité de tout expliquer sans avoir recours à des notions entièrement nouvelles.

Je me suis proposé de décrire, dans cet opuscule, une partie des recherches qui ont conduit à la découverte du professeur Röntgen. L'étude des décharges dans les gaz forme déjà un ensemble fort important, qu'il serait téméraire de vouloir exposer dans tous ses détails; je me contenterai d'en marquer les étapes, en insistant particulièrement sur les phénomènes qui peuvent servir de pierre de touche à la théorie.

Il m'a paru intéressant de rapprocher du phénomène spécial qui nous occupe un certain nombre de faits singuliers et peu connus, qui présentent, avec plusieurs particularités de la décharge dans les gaz ou avec les propriétés de la radiation découverte par le professeur Röntgen, une parenté évidente. Ces faits, avec les théories qui les relient, sont indiqués dans la première Partie de l'Ouvrage. La seconde Partie est ainsi débarrassée de tous les phénomènes contingents et débute au cœur du sujet.

A mesure que nous avançons dans l'étude de la décharge dans les gaz, exposée dans les Chapitres IV et V, la découverte de M. Röntgen devient plus nette entre les lignes, jusqu'au moment où le hasard la dévoile à un physicien heureux et perspicace, qui a su l'extraire d'un ensemble compliqué de phénomènes.

Jusqu'à ce moment, l'apport de la Physique française est restreint ; à peine trouvera-t-on de loin en loin, depuis les anciennes recherches d'Abria et de Masson, une étude ayant trait au sujet qui nous occupe. Après la publication du Mémoire de M. Röntgen, l'indifférence fait place à l'intérêt le plus vif. De toutes parts on se met à l'œuvre; on perfectionne la technique expérimentale, on applique les nouvelles radiations aux études les plus diverses; on cherche à fixer les règles d'emploi des tubes, sur lesquelles nous avons tenu à insister particulièrement. Puis, soudain, se révèle la grande importance des substances phosphorescentes. Liées d'abord, pour le renforcement des radiations, aux rayons découverts par M. Röntgen, elles s'en dégagent comme par enchantement; une nouvelle découverte prend la place de celle qui vient d'être accueillie avec un si grand enthousiasme et qui n'en formera désormais qu'un cas particulier.

En quelques semaines, la Physique française a regagné le temps perdu; elle paie sa dette au trésor commun et l'augmente d'un gros intérêt.

Pavillon de Breteuil, Sèvres, mars 1896.

LES

RAYONS X

ET LA

PHOTOGRAPHIE A TRAVERS LES CORPS OPAQUES.

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE I.

L'ÉTAT GAZEUX.

1. Théorie cinétique. — Le pouvoir d'expansion des gaz était attribué autrefois aux forces répulsives des molécules. Mais, l'expérience ayant montré que la détente d'un gaz dans un espace clos n'élève pas sensiblement sa température, il devint évident, le principe de l'équivalence entre la chaleur et le travail une fois admis, que la répulsion ne pouvait pas être une propriété essentielle des corps à l'état gazeux. On revint alors à une idée émise déjà par Jacques Bernoulli, et l'on fonda, sur une base mathématique solide, la théorie cinétique des gaz.

Cette théorie ne fut point adoptée sans une vive résistance. Elle conduisait, en effet, à attribuer aux corpuscules de la matière gazeuse des vitesses de translation qui parurent d'abord invraisemblables. Aux températures or-

dinaires, les molécules des gaz de l'air devaient posséder la vitesse d'une balle de fusil, et l'on s'expliquait mal que, dans un air tranquille, une fumée légère mît un temps aussi long à se dissiper ; que la diffusion de la matière et de la chaleur fût si lente dans les gaz ; qu'en un mot, tout se passât presque comme si les molécules étaient en repos.

La théorie enseignait de plus que les vitesses sont proportionnelles à la racine carrée de la température, comptée à partir du zéro absolu, et inversement proportionnelles à la densité des gaz. On en concluait que, dans les flammes, les molécules d'hydrogène devaient atteindre parfois des vitesses de 4 ou 5 kilomètres par seconde, et devenir de véritables projectiles capables d'un certain effet destructeur.

On pensa un instant que la théorie succomberait sous ses propres conséquences. Elle n'en fut que plus rapide à se développer, car ses promoteurs, ayant à répondre à de multiples objections, en firent l'objet constant de leurs investigations.

Les critiques furent bientôt réfutées par de bons arguments.

Si, dans une atmosphère ne possédant pas de mouvement d'ensemble, la diffusion se fait avec une extrême lenteur, c'est parce que les molécules sont sans cesse arrêtées dans leur course, renvoyées dans toutes les directions, et ne parcourent des trajectoires rectilignes que sur des longueurs de l'ordre du dixième de micron.

C'est après une quantité innombrable de chocs qu'une particule de matière gazeuse traverse une couche d'une certaine épaisseur, et le mélange parfait de deux gaz, s'il n'est pas favorisé par des forces agissant dans un sens précis, exige en général un temps très long. D'ailleurs, les lois de la diffusion qu'a révélées l'expérience sont bien d'accord avec les résultats de l'investigation mathé-

matique, dans laquelle on n'envisage que la probabilité des mouvements dans tous les sens.

La théorie cinétique des gaz a été développée surtout par le grand physicien Clausius. La loi mathématique de la répartition des vitesses entre les molécules en est un élément des plus importants. Cette loi a été donnée par l'illustre Maxwell. Elle dérive de celle que Laplace avait trouvée pour la répartition des écarts d'une valeur moyenne; mais, tandis que la loi de Laplace se rapporte aux phénomènes symétriques, dans lesquels la probabilité des écarts est la même dans le sens positif et dans le sens négatif, celle de Maxwell est dissymétrique, puisque les vitesses, étant prises en valeur absolue sans intervention de la direction du mouvement, sont limitées d'une part à une valeur nulle, tandis que, de l'autre côté, elles peuvent s'étendre jusqu'à l'infini (¹).

La théorie cinétique des gaz donne aisément l'explication de certains faits d'observation courante, qui resteraient mystérieux si l'on se bornait à les juger d'après l'équation caractéristique des gaz.

Que se passe-t-il, par exemple, à la limite d'une atmosphère? Aucune formule exacte pour l'ensemble n'est susceptible de nous l'indiquer, même approximativement.

Dans la théorie cinétique, nous considérons la molécule isolée. Si elle est animée d'une vitesse de bas en haut, elle s'éloigne de l'astre auquel elle appartient, pour retomber lorsque sa vitesse est épuisée. Si l'astre est petit, la vitesse grande, la molécule s'éloigne et ne revient plus. C'est pourquoi les corpuscules célestes sont dépourvus d'atmo-

(¹) L'expression de la loi de Maxwell est la suivante :

$$y = Cx^2 e^{-x^2}.$$

y est le nombre relatif de molécules possédant la vitesse x, C une constante.

sphère, tandis que les astres de plus forte dimension en sont entourés. Les gaz dont la molécule est douée d'une grande vitesse se sont conservés autour des astres les plu gros, tels l'hydrogène et l'hélium sur le Soleil; les gaz de plus forte densité sont restés attachés à des corps céleste de moindre importance.

2. La Molécule et l'Atome. — Nous ne discuterons point l'existence de la molécule, dernière subdivision de la matière dont s'occupe la Physique ; nous ne chercherons pas davantage à démontrer que cette molécule est un conglomérat dont le lien peut être brisé par des procédés particuliers. Ce sont des faits que l'on cherchera à établir ou à combattre dans un ouvrage de doctrine. Nous les accepterons comme l'expression la plus probable et certainement la plus commode de l'ensemble des phénomènes physico-chimiques.

Pour la commodité de l'écriture, les chimistes supposent la molécule composée d'un nombre bien défini d'atomes, généralement très petit, et ils envisagent cet atome comme l'élément ultime, insécable et invariable de la matière pondérable.

Clausius a donné une formule qui exprime le rapport du travail interne de la molécule au travail total fourni à une masse gazeuse susceptible de se dilater sous pression constante. Ce rapport est exprimé en fonction des deux chaleurs spécifiques du gaz, sous pression constante et sous volume constant [1]. Il admet deux limites, qui sont

---

[1] Voici la formule de Clausius :

$$\frac{K}{H} = \frac{3}{2}\,\frac{C - c}{c}.$$

K = énergie interne.
H = énergie totale.
C, *c*, chaleurs spécifiques sous pression constante et à volume constant.

0 et 1; le travail interne peut, en effet, être nul, ou peut former à lui seul le travail total. Dans le premier cas, le rapport des chaleurs spécifiques est égal à $\frac{5}{3}$; dans l'autre, il est égal à l'unité.

Or on connaît certains corps gazeux, la vapeur de mercure ou de cadmium, par exemple, qui correspondent à la première de ces valeurs. L'argon et l'hélium, découverts récemment, sont dans le même cas. Pour ces corps, le travail interne de la molécule est nul, et on les a nommés *monoatomiques*. Suivant l'idée des chimistes, leur molécule est composée d'un seul atome.

On sait, d'autre part, que le spectre de ces gaz se compose de plusieurs raies qui, pour les deux premiers au moins, possèdent la propriété d'être particulièrement fines. Mais le fait de donner naissance à un spectre composé même d'une seule raie indique que la molécule qui l'émet contient au moins deux éléments susceptibles de se déplacer (1).

L'argon a un spectre complexe, et l'on peut en conclure que sa molécule se compose d'un grand nombre d'éléments distincts; cependant la théorie peut ne pas être en défaut. En effet, les spectres de raies n'ont pas pu, jusqu'ici, être obtenus par une simple élévation de la température du gaz, avec laquelle toute action chimique ou électrique est évitée (2). Or, dans la détermination des chaleurs

---

(1) Ces mouvements internes de la molécule, d'apparence compliqués, si l'on en juge par le nombre parfois très grand de raies spectrales que fournit un élément, se produisent suivant des lois numériques, souvent très simples, dont plusieurs sont aujourd'hui connues.

Par exemple, M. Balmer a réussi à représenter la fréquence des diverses vibrations correspondant aux raies spectrales de l'hydrogène par la formule

$$p = p_0 \left(1 - \frac{4}{n^2}\right),$$

n étant un nombre entier égal ou supérieur à 3.

(2) *Voir*, en particulier, les recherches de M. Pringsheim présentées récemment à l'Académie des Sciences de Berlin.

spécifiques, les procédés thermiques interviennent seuls. On peut en conclure que la molécule monoatomique contient plusieurs éléments indifférents à la chaleur, mais qui entrent en vibration lorsqu'on leur applique un mode d'excitation convenable.

3. Les forces moléculaires. — Le mode d'excitation le plus fréquemment employé pour obtenir les spectres des gaz consiste à les soumettre à l'action de décharges électriques dont nous étudierons plus loin la nature. On est ainsi conduit directement à admettre que les éléments de la molécule sont susceptibles de vibrer sous l'action d'impulsions de nature électrique, et qu'ils sont eux-mêmes doués de propriétés analogues à celles des corps chargés d'électricité. La grande loi de l'électrolyse découverte par Faraday s'adapte merveilleusement à cette idée; on n'aura donc pas de peine à la considérer comme parfaitement légitime.

Les molécules des gaz monoatomiques sont-elles composées d'éléments matériels distincts possédant chacun une charge électrique? Ces éléments sont-ils insécables, formant un tout qui possède ses charges distinctes? On ne saurait le dire pour le moment; mais nous retiendrons comme très probable ce fait qu'il existe, dans la molécule de la constitution la plus simple, un ensemble parfois compliqué, de nature essentiellement électrique, susceptible de se déformer sous l'action de certaines impulsions, et de vibrer suivant un ou plusieurs rythmes parfaitement définis.

Les durées d'oscillation sont légèrement variables d'une molécule à l'autre et sont sans doute influencées par les molécules voisines. Mais, pour plusieurs corps monoatomiques, la durée de chaque vibration particulière ne diffère pas d'un millionième de sa valeur moyenne pour les

molécules les plus perturbées ([1]). La molécule vibre avec la régularité d'un excellent chronomètre, ce qui est l'indice de propriétés élastiques d'une remarquable constance.

Quelles sont les forces qui agissent entre les molécules voisines?

D'abord, les attractions newtoniennes, qui s'exercent en raison directe des masses et qui sont une propriété additive de la matière, doivent subsister entre ses dernières particules. Puis, d'autres forces, insensibles aux distances mesurables, viennent s'y ajouter. On sait, par l'expérience classique de M. Rowland, répétée par M. Himstedt, qu'une masse électrique en mouvement produit un effet électrodynamique semblable à celui du courant électrique découvert par Ampère. Or, dans les mouvements des molécules, les charges électriques sont entraînées de telle sorte que, à ce point de vue particulier, une molécule pourra presque toujours être considérée comme le support d'une oscillation électrique. Les circuits voisins exercent les uns sur les autres certaines actions mécaniques, d'origine électromagnétique, dont la loi pourrait être trouvée si l'on connaissait la forme des circuits. M. Galitzine a montré récemment ([2]) que ces forces varient suivant une

---

([1]) Le procédé d'examen des raies du spectre à l'aide d'un spectroscope, même très dispersif, ne conduit pas, à beaucoup près, à des résultats aussi détaillés que la méthode de visibilité des franges, imaginée par M. Fizeau et perfectionnée par M. Michelson, qui l'a employée avec beaucoup de succès à l'étude du spectre d'un grand nombre de corps et à diverses recherches de Physique ou d'Astronomie.

Les études de M. Michelson ont montré qu'en général les vapeurs monoatomiques donnent des raies spectrales extrêmement fines. Le cadmium, en particulier, donne trois raies visibles, largement séparées et d'une finesse telle que leurs interférences sont parfaitement nettes pour une différence de marche de 500000 longueurs d'onde. (*Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures*, t. XI).

([2]) B. Galitzine, *Ueber die Molecularkräfte und die Elasticität der Molecule* (*Bulletin de l'Académie des Sciences de Saint-Pétersbourg*, t. III, p. 1; 1895).

puissance inverse de la distance certainement supérieure à la troisième, et probablement voisine de la quatrième.

D'autre part, Maxwell avait admis que, à partir d'une distance très faible, les molécules se repoussent suivant la réciproque de la cinquième puissance de leur distance. Ces deux hypothèses sont bien d'accord entre elles, puisque, quels que soient les coefficients des deux termes, l'ensemble des deux forces doit s'annuler dans une certaine région, tandis que la force est attractive au dehors, répulsive à l'intérieur. La répulsion, qui prend des valeurs considérables lorsque les molécules arrivent très près l'une de l'autre, les éloigne après ce que l'on pourrait nommer leur *choc*.

Cette hypothèse de Maxwell, d'une répulsion entre les molécules, a été attaquée par les mêmes arguments qui avaient fait abandonner, d'une manière générale, la conception fondamentale de l'ancienne théorie des gaz. Mais les deux cas ne sont nullement comparables. L'idée actuelle attribue à cette force répulsive un rayon d'action sensible très petit, comparé à la distance des molécules dans un gaz voisin de l'état parfait. Dans une détente quelconque, faite en partant de cet état du gaz, le travail produit par ces répulsions est très petit, et doit échapper à l'expérience. Il serait probablement appréciable si l'on partait d'un gaz dans les conditions où le produit pv de la pression par le volume a dépassé sensiblement sa valeur minima.



CHAPITRE II.

LA LUMIÈRE.

4. Le spectre. — L'éther, qui propage, par ses vibrations transversales, un genre particulier d'énergie, semble susceptible de prendre indifféremment tous les modes vibratoires imaginables. On n'a pas reconnu, jusqu'ici, qu'il prît certaines périodes de préférence à d'autres, et, lorsqu'on a trouvé une limite à sa vibration, on en a toujours découvert la cause dans des propriétés de la matière indépendantes de celles de l'éther.

Peu à peu, les modes de vibration connus sont allés en augmentant; le spectre visible, qui forme à peu près une octave de vibrations, s'est étendu dans les deux sens, et a été exploré jusqu'à une grande distance de ses limites. La Photographie nous a révélé les longueurs d'onde les plus courtes, tandis que la mesure directe de l'énergie, à l'aide d'un bolomètre à variation de résistance, ou d'une pile thermo-électrique, a permis d'explorer les grandes longueurs d'onde.

L'une des difficultés de l'étude du spectre ultra-violet réside dans le pouvoir absorbant de presque tous les corps pour les radiations de faible longueur d'onde. Déjà, par l'emploi d'un système optique en quartz, on recule beaucoup les limites des radiations que permettent de mesurer

les appareils en flint. Plus loin, l'air lui-même oppose aux mesures une première impossibilité. Pendant longtemps, les plus courtes longueurs d'onde connues furent celles qu'avait mesurées M. Cornu, dans le spectre de l'aluminium. La dernière raie non absorbée correspond, comme l'a montré l'illustre physicien, à une longueur d'onde de $0^{\mu},185$. Mais l'exploration a pu être poussée plus loin encore, en attendant une mesure précise. Un savant autrichien, M. Schumann, est parvenu, par des procédés photographiques très délicats, et en opérant dans le vide, à révéler l'existence de radiations dont la longueur d'onde est voisine de $0^{\mu},1$. Dans ces recherches, le grain de la plaque rend les opérations particulièrement incertaines, et l'on n'obtient des résultats bien nets que par l'emploi d'émulsions très homogènes.

Dans l'infra-rouge, de bonnes mesures ont été faites par le regretté Mouton, M. Henri Becquerel, MM. Desains et Curie, plus récemment, par M. Rubens et M. Paschen, et par M. Carvallo. Mais le plus important ensemble de recherches sur cette portion du spectre est dû à M. Langley, secrétaire de la *Smithsonian Institution*, à Washington. Les radiations qu'il a suivies, sinon mesurées exactement, atteignent la longueur d'onde de 30^{μ}. Puis vient un espace encore inexploré, et vers 6^{mm}, nous retrouvons des longueurs d'onde mesurées dont l'origine est purement électrique.

Les recherches de Hertz l'avaient conduit, comme on sait, à produire, par la décharge d'un système de conducteurs d'une forme particulière, des oscillations électriques extrêmement rapides, que Maxwell avait, depuis longtemps, assimilées aux oscillations lumineuses; en effet, depuis que l'on sait produire des vibrations électriques encore plus rapides que celles de Hertz, on a pu répéter, par leur

moyen, toutes les expériences classiques de l'Optique, y compris la double réfraction.

Les oscillations électriques de faible longueur d'onde ont été obtenues par M. Righi d'abord, puis, plus récemment, par M. Lebedef. Le nombre que nous venons de citer, de 6^{mm}, se rapporte aux expériences de ce savant.

La vitesse de propagation des oscillations électriques a été mesurée directement par plusieurs physiciens, parmi lesquels nous citerons M. Blondlot, de Nancy, et M. J. Trowbridge, de Harvard College. Cette vitesse, que les mesures ont révélée égale à celle de la lumière, ne laisse aucun doute sur l'identité des mouvements de l'éther auxquels correspondent les ondes lumineuses et les ondes d'origine électrique. Toutes les théories de l'induction admettent la possibilité d'ondes électriques plus lentes que celles qui ont été observées, jusqu'à une lenteur infinie. Ces ondes se propagent comme les ondes rapides, et il n'y a aucune raison de croire que le spectre soit limité au-dessous des radiations de longueur d'onde infinie.

Il reste une lacune à combler ; entre les longueurs d'onde de 30^{μ} et celles de 6^{mm}, on n'a encore rien mesuré ; mais chaque année resserre l'espace resté vide.

5. Émission et absorption. — Les corps susceptibles d'émettre une radiation donnée sont aussi ceux qui l'absorbent. Ce principe, établi pour la première fois dans toute sa généralité par Kirchhoff, est déjà contenu dans les idées de Prévost, et se déduit immédiatement du principe beaucoup plus général de Sadi Carnot. Si la loi de Kirchhoff était erronée, dans le cas où aucune modification chimique ne se produit, on pourrait, en effet, par un arrangement particulier de corps divers, faire passer continuellement de la chaleur de l'un à l'autre, dans le sens inverse

de la chute de température. L'hypothèse des charges atomiques fait rentrer dans les équations générales appliquées à des phénomènes connus les lois de l'émission et de l'absorption (**2**).

Dans cette hypothèse, les molécules ne sont pas autre chose que des excitateurs et des résonateurs électriques, auxquels on peut appliquer les équations qui régissent les actions mutuelles de ces deux espèces d'appareils. Cette théorie fait ainsi remonter à une cause commune l'ensemble du spectre, quelle que soit la longueur d'onde de la radiation considérée. L'identité des oscillations électriques et des radiations proprement dites étant déjà admise, on ne fait que compléter l'idée en adoptant la similitude des causes.

Il ne semble pas, à première vue, que le spectre dû à la radiation des particules ultimes de la matière doive être limité du côté des grandes longueurs d'onde. Toutefois, M. Willy Wien a démontré que, si l'on admettait l'identité de la chaleur rayonnante (1) et des oscillations électriques et la rigueur absolue du principe de Carnot, on devrait renoncer à chercher, dans le spectre produit par les vibrations des molécules, des radiations de longueur d'onde infinie.

L'idée la plus répandue parmi les physiciens est que les spectres de lignes sont dus à l'oscillation électrique à l'intérieur de la molécule; les spectres de bandes reconnaissent la même cause et prennent naissance lorsque les circuits moléculaires sont assez voisins pour modifier leurs périodes respectives d'oscillation (**3**). Quant aux spectres d'incandescence proprement dits, qui sont absolument continus et suivent une loi de répartition déterminée, on

---

(1) W. Wien, *Die obere Grenze der Wellenlängen, welche in der Wärmestrahlung fester Körper vorkommen können* (*Annales de Wiedemann*, t. XLIX, p. 633; 1893).

les attribue en général à un mouvement d'ensemble de la molécule.

Quelques physiciens établissent encore une distinction entre les mouvements internes auxquels les particules matérielles prennent part, et les vibrations n'intéressant que les charges atomiques. Suivant M. O. Lodge, la période de ces dernières oscillations serait incomparablement plus courte que celle des mouvements atomiques. Les lois de la propagation des mouvements corrélatifs de l'éther à l'intérieur des corps, c'est-à-dire au voisinage des particules matérielles, pourraient être très différentes dans l'un et l'autre cas. La résonance mettrait en mouvement soit des systèmes possédant une certaine masse, soit des charges n'ayant aucune inertie appréciable.

6. La réfraction anomale. — Dans la région du spectre où ils sont très transparents, les corps réfractent la lumière d'autant plus que les vibrations qui la produisent sont plus rapides. Il n'en est pas de même dans les régions où les radiations sont absorbées. M. Le Roux, en 1862, M. Christiansen, quelques années après, ont découvert le phénomène de la dispersion anomale, qui se produit au voisinage des bandes d'absorption.

Toutes les théories modernes de l'Optique tiennent compte de ce renversement dans l'ordre des réfrangibilités. L'idée fondamentale de ces théories a été indiquée par M. Boussinesq [1] en 1867; elle avait été déjà conçue, paraît-il, et exposée de vive voix bien antérieurement par sir G.-G. Stokes.

Cette théorie a été, pour la première fois, poursuivie

---

[1] Boussinesq, *Théories nouvelles des ondes lumineuses* (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXV, p. 235; 1867).

dans ses conséquences par Sellmeier (1872), puis par Helmholtz (1875). Elle a été reprise par divers savants, et exposée en particulier par lord Kelvin dans des leçons qu'il fit, en 1884, à Johns Hopkins University, à Baltimore.

« Je suis confus d'avouer, disait à ce propos l'illustre savant, que je n'avais jamais entendu parler de la dispersion anomale jusqu'au moment où je l'ai aperçue dans ces formules; et j'appris alors qu'on l'avait observée depuis huit ou dix ans [1]. »

L'idée directrice de la théorie est que, lorsque l'oscillation de l'éther autour de la molécule possède une période peu supérieure à celle de la vibration que la molécule elle-même peut prendre, celle-ci exécute des mouvements de grande amplitude; l'énergie cinétique des molécules est alors du même ordre de grandeur que celle de l'éther dans lequel elles se meuvent, et la vitesse de propagation du mouvement se trouve modifiée.

La formule que lord Kelvin déduit de sa théorie conduit à des bandes d'absorption dans lesquelles l'indice prend toutes les valeurs à partir d'une certaine grandeur positive jusqu'à zéro, et même jusqu'à des valeurs imaginaires. Celles-ci correspondent à l'absence totale de propagation. D'après la formule, les bandes d'absorption sont nettes vers les grandes longueurs d'onde, diffuses à l'autre extrémité.

Les premières recherches sur la dispersion anomale

---

(1) Sir W. THOMSON, *Conférences scientifiques et allocutions*, traduites par P. LUGOL, avec des extraits de Mémoires récents de sir W. Thomson et quelques notes par M. BRILLOUIN (Paris, Gauthier-Villars et fils; 1893).

Voici la formule de dispersion donnée par lord Kelvin :

$$n^2 = 1 - A T^2 \left(1 + \frac{q_1 T^2}{\tau_1^2 - T^2} + \frac{q_2 T^2}{\tau_2^2 - T^2} + \dots\right)$$

n est ici l'indice de réfraction, A une constante, q_1, q_2, des nombres, enfin τ_1, τ_2,... les durées de vibration propres des molécules absorbantes. T est la période de la vibration lumineuse considérée.

avaient montré seulement que l'ordre de réfrangibilité est renversé dans certains corps. Les expériences plus récentes d'un grand nombre de physiciens ont conduit au résultat surprenant que l'indice de réfraction de plusieurs corps, dans des régions particulières du spectre, est plus petit que l'unité.

Kundt [1] et ses disciples, MM. du Bois et Rubens, ont étudié à ce point de vue un certain nombre de métaux. M. D. Shea a montré que la loi de Snellius-Descartes ne se vérifie pas dans ces corps, de telle sorte que l'indice doit être défini à la fois en fonction de la longueur d'onde et de l'incidence. Voici quelques indices ramenés aux rayons normaux :

Métaux.	Indices pour les raies [2]			
	Li α	D	F	G
Fer	3,12	2,72	2,43	2,05
Cobalt	3,22	2,76	2,39	2,10
Nickel	2,04	1,84	1,71	1,54
Argent	0,25	0,27	0,20	0,27
Or	0,29	0,66	0,82	0,93
Cuivre	0,35	0,60	1,12	1,13
Platine	2,02	1,76	1,63	1,41

Les résultats suivants sont dus à M. Pflüger [3] :

---

[1] A. KUNDT, *Ueber die Brechungsexponenten der Metalle* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXIV, p. 469; 1888). — H. DU BOIS et H. RUBENS, *Brechung und Dispersion des Lichtes in einigen Metallen* (*Ibid.*, t. XLI, p. 507; 1890). — D. SHEA, *Zur Brechung und Dispersion des Lichtes durch Metallprismen* (*Annales de Wiedemann*, t. XLVII, p. 177; 1892).

[2] Voici les longueurs d'ondes correspondant aux raies portées dans les Tableaux :

Li α	$0^{\mu},671$
D	0 ,589
Tl (vert)	0 ,535
F	0 ,486
Sr (bleu)	0 ,461
G	0 ,434

[3] A. PFLÜGER, *Anomale Dispersionscurven einiger fester Farbstoffe* (*Annales de Wiedemann*, t. LVI, p. 412; 1895).

Corps.	Indices pour les raies					
	Li α	D	Tl	F	Sr	G
Fuchsine..........	2,34	2,64	1,95	1,05	0,83	1,04
Cyanine...........	2,08	1,70	1,20	1,45	1,49	1,61
Rouge de Magdala.	2,06	1,90	1,56	1,54		1,72
Violet d'Hofmann.	2,53	2,20	1,27	0,86		1,32

Ces quatre substances possèdent des bandes d'absorption ainsi définies :

Corps.	Limites.	
Fuchsine............	0μ,623 net.	0μ,45 estompé.
Cyanine.............	0 ,650 »	0 ,50 un peu estompé.
Rouge de Magdala..	0 ,597 »	0 ,48 très estompé.
Violet d'Hofmann...	0 ,660 »	0 ,49 estompé.

Ces expériences confirment d'une manière remarquable la théorie de lord Kelvin.

Les expériences sur les métaux montrent que, à mesure qu'on s'approche des faibles longueurs d'onde, l'indice tend vers l'unité en partant soit de valeurs plus fortes, soit de valeurs plus faibles; le cuivre seul fait exception.

La théorie indique que la diminution de l'indice vers les faibles longueurs d'onde doit se produire dans la première partie de la bande d'absorption; le relèvement a lieu vers la fin de la bande, après un minimum généralement inférieur à l'unité. Toutes les valeurs du premier Tableau indiquent une dispersion anomale, puisque l'indice n'augmente vers le violet que pour des valeurs inférieures à l'unité.

Les substances moins absorbantes étudiées par M. Pflüger permettent de suivre le phénomène sur une plus grande étendue. Dans tous ces corps, le passage par le minimum est nettement accusé.

Le même phénomène se retrouve dans l'infra-rouge. On sait, en effet, que les radiations infra-rouges sont absorbées par l'eau à une petite distance du spectre visible; pour un

œil sensible aux radiations de 2^{μ}, l'eau serait noire comme de l'encre. Or on a trouvé que l'indice de réfraction de ce liquide, pour les oscillations lentes d'origine électrique, est compris entre 8 et 9. C'est l'indice anomal correspondant au commencement de la bande d'absorption.

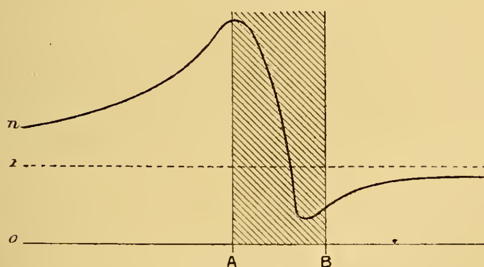
M. Drude (¹) a trouvé enfin une dispersion anomale bien nette dans divers liquides pour des ondes électriques de l'ordre de 1^{m}. Voici quelques-uns de ses résultats :

	$\lambda = 12^{m}$	2^{m}	$0^{m},75$
Glycérine........	$n = 7,50$	6,25	5,04
Alcool amylique.	3,78	3,29	2,35
Acide acétique...	3,21	2,66	2,51

Ces trois liquides présentent une forte absorption dans cette région.

La courbe n (*fig.* 1) donne une idée de la variation de l'indice dans un corps absorbant, déduite en même temps

Fig. 1.



de l'expérience et de la théorie. La fréquence de la vibration lumineuse va en croissant de gauche à droite dans le diagramme.

(¹) P. DRUDE, *Ueber die anomale elektrische Dispersion von Flüssigkeiten* (*Abhand. der Math. phys., Classe der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften Göttingen*, t. XXIII, p. 1; 1896).

La transparence remarquable de certains métaux après la dernière bande d'absorption est bien d'accord aussi avec ce qu'enseigne la théorie.

Sir G.-G. Stokes a découvert, en effet, que les miroirs en argent poli ne peuvent pas être employés comme réflecteurs pour l'étude du spectre ultra-violet, parce qu'ils éteignent les rayons les plus réfrangibles, et M. Cornu est arrivé au même résultat avec l'argenture chimique. M. de Chardonnet [1], au cours de ses importantes recherches sur l'absorption dans l'ultra-violet, a reconnu que l'on obtient une action photographique énergique derrière un miroir de Foucault, complètement opaque pour les radiations visibles. L'image de l'arc électrique peut être photographiée en quelques secondes au travers de deux miroirs de Foucault complètement opaques.

On sait aussi que la feuille d'or laisse passer des radiations d'un beau vert-pomme. En se reportant aux expériences de Kundt et de ses élèves, on verra, en effet, que la bande d'absorption dans ce métal doit prendre fin vers l'extrémité violette du spectre visible. L'indice étant déjà beaucoup relevé dans une partie du spectre visible lui-même, l'absorption y est relativement faible, de telle sorte que l'extrémité rouge seule est complètement absorbée.

7. La lumière ultra-violette. — Les radiations de très faible longueur d'onde présentent un intérêt tout particulier, en connexion avec la matière pondérable. La limite de grandeur que l'on assigne à la molécule est, en effet, de l'ordre du millionième de millimètre, pour les molécules les plus grosses. Les plus courtes longueurs d'onde étu-

---

(1) De Chardonnet, *Sur la transparence actinique de quelques milieux et, en particulier, sur la transparence actinique des miroirs de Foucault et leur application en Photographie* (*Journal de Physique*, t. I, p. 305; 1882).

diées jusqu'à ce jour ne sont que cent fois plus étendues, et, comparées à ces oscillations, les dimensions moléculaires ne sont plus négligeables. Par rapport à ces radiations, la matière apparaît déjà avec une certaine discontinuité et possède des propriétés bien différentes de celles qu'elle manifeste vis-à-vis des radiations ordinaires. On sait, depuis Fresnel, que les corps grenus, dont l'élément n'est pas lui-même absorbant, sont d'autant plus transparents que les radiations qui les frappent ont une plus grande longueur d'onde. Clausius et lord Rayleigh ont établi des formules exprimant le résidu d'énergie vibratoire après le passage à travers un corps composé de petits sphérules égaux [1].

D'autre part, les recherches que l'on a pu faire à l'aide des oscillations électriques ont montré que la plupart des corps qui ne doivent leur opacité qu'à leur état grenu sont d'une parfaite transparence dès que la longueur d'onde dépasse sensiblement l'étendue du grain. Les premières recherches de Hertz sur la réfraction des ondes électriques ont été faites sur un prisme d'asphalte qui se montra transparent. Le bois, le carton, l'ébonite et, d'une manière générale, tous les corps non conducteurs laissent passer les radiations d'origine électrique. On n'aura donc pas de peine à admettre qu'il puisse en être de même des dernières particules de la matière, lorsque l'on aura dépassé les régions du spectre dans lesquelles elles résonnent avec facilité.

Ces propriétés de la lumière ultra-violette sont de celles que l'on peut prévoir avec une plus ou moins grande probabilité; il en est d'autres que rien ne pouvait faire soup-

---

(1) Ces formules sont de la forme

$$I = I_0 e^{-\frac{al}{\lambda^n}},$$

a est une constante, l l'épaisseur traversée; $n = 2$ ou 4, suivant les auteurs.

çonner, et dont la découverte est due en grande partie au hasard.

Au début de ses recherches sur les oscillations électriques, Hertz observa une action très marquée de l'étincelle du circuit primaire sur celle du résonateur ([1]). Tandis que cette dernière éclatait à chaque oscillation à l'air libre, elle cessait aussitôt que les boules entre lesquelles se produisait la décharge étaient enfermées dans une boîte quelconque. Démontant successivement toutes les parties de la boîte, Hertz reconnut bientôt qu'une seule propriété de l'étincelle, sa radiation lumineuse, était en jeu dans le phénomène. L'interposition d'un corps opaque quelconque, conducteur ou diélectrique, arrêtait également l'action; quelques corps cristallisés faisaient exception; le sucre, l'alun, le sel gemme, la diminuaient très peu sous de faibles épaisseurs; quant au quartz, il se montra d'une transparence telle que, sous une épaisseur de plusieurs centimètres, son absorption était à peine sensible.

Il était dès lors naturel d'attribuer l'action de l'étincelle aux radiations de courte longueur d'onde, qui l'accompagnent toujours lorsqu'elle éclate entre deux morceaux de métal. L'expérience confirma immédiatement cette manière de voir, car les sources de lumière quelconque agissaient comme l'étincelle électrique, et se montrèrent d'autant plus actives qu'elles contenaient une plus grande proportion de radiations ultra-violettes.

En masquant l'une après l'autre toutes les parties de l'ensemble formé par les deux boules et leur intervalle, Hertz reconnut que l'organe le plus sensible à la lumière ultra-violette est l'électrode négative.

([1]) Hertz, *Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXI, p. 983; 1887).

Cette action de la lumière ultra-violette ne se fait pas seulement sentir sur un intervalle de peu d'étendue où l'étincelle est susceptible d'éclater; elle est tout aussi marquée dans le cas de la décharge lente d'un corps électrisé isolé dans l'espace, ainsi que l'a montré M. Hallwachs. Ce singulier phénomène, étudié par M. Righi, M. Stoletof, MM. Bichat et Blondlot, M. Hoor, M. Branly, et d'autres physiciens, a été employé pour la première fois par M. Hallwachs dans l'étude quantitative de l'absorption des radiations [1]. L'électromètre servait à déterminer la proportion de l'énergie vibratoire d'une qualité déterminée qui traversait le corps en expérience.

La cause de ce phénomène, qui paraissait au début complètement isolé, a été trouvée par MM. Lenard et Wolf [2]; ils ont ramené la décharge des corps sous l'influence de la lumière ultra-violette à une convection de l'électricité dont les poussières détachées de la masse formaient le support.

Ces deux habiles physiciens sont parvenus, à l'aide d'un jet de vapeur sursaturée [3], à suivre exactement la marche de cette poussière, et à en constater l'existence autour du corps électrisé négativement toutes les fois qu'il perdait

---

(1) HALLWACHS, *Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXIII, p. 301; 1888). — *Ueber den Zusammenhang des electrischen Electricitätsverlustes durch Beleuchtung mit der Lichtabsorption* (*Ibid.*, t. XXXVII, p. 666; 1889).

(2) LENARD et WOLF, *Zerstäuben der Körper durch des ultraviolette Licht* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXVII, p. 443; 1889).

(3) M. Aitken et, après lui, R. von Helmholtz, ont démontré que l'air peut se sursaturer très fortement d'humidité, à la condition d'être complètement dépourvu de poussières; la condensation qui se produit sur les noyaux préexistants est d'autant plus rapide que les particules en suspension sont plus abondantes.

M. Aitken a utilisé le premier ce phénomène pour déduire, de l'aspect du jet de vapeur, le nombre moyen de centres de condensation existant dans l'unité de volume d'air.

rapidement sa charge sous l'action de la radiation. De tous les métaux, c'est l'argent qui s'est montré le plus facile à pulvériser par la radiation. Viennent ensuite l'or ([1]), le fer, le plomb, l'étain, le cuivre, le platine, le mercure et le zinc ([2]).

Le quartz lui-même perd, à la surface opposée à la source de lumière, des poussières qui s'échappent normalement à son plan. MM. Lenard et Wolf, qui ont étudié le phénomène de très près, pensent que les particules quittant le cristal sont composées de silicate de soude; ce sel, absorbant la lumière ultra-violette, doit subir son action et prendre un état vibratoire qui le détache de la masse où il est enfermé. Les expériences sur l'électrolyse du verre que nous rapporterons dans le Chapitre III enlèvent à cette hypothèse ce qu'elle pourrait avoir d'invraisemblable à première vue.

La pulvérisation des métaux n'est pas, du reste, le seul mode d'action de la lumière ultra-violette sur les décharges

---

([1]) La pulvérisation des métaux s'observe, apparemment du moins, en dehors de l'action de la lumière ultra-violette; M. Pellat a démontré, par l'étude des forces électromotrices de contact, que deux plaques de métal en regard font échange de matière.

L'évaporation du métal a été fréquemment observée, soit dans l'emploi des tubes à vide où la pulvérisation peut être ramenée à l'action de la lumière ultra-violette, soit dans les lampes à incandescence où cette action est moins évidente. M. Goldstein signala, en 1880, la présence, sur les cathodes, de figures d'une forme particulière, attribuables à une corrosion du métal en des endroits bien déterminés par la forme des électrodes et celle du tube.

M. Fleming a indiqué l'un des premiers, en 1883, l'évaporation des attaches dans les lampes à incandescence. L'ampoule se recouvre intérieurement de poudre métallique abandonnée par les fils qui amènent le courant à la fibre de charbon. Cette dernière projette une ombre bien nette dans le miroir métallique, ce qui montre que les particules arrachées aux électrodes se meuvent en ligne droite, sans doute avec une grande vitesse.

([2]) On remarquera que les deux métaux les plus sensibles à l'action sont ceux qui, d'après Kundt et M. Shea, sortent de la bande d'absorption au commencement de l'ultra-violet. Il serait intéressant de voir si l'argent employé comme cathode dans les tubes de Crookes favorise la production des rayons cathodiques.

électriques. M. Svante Arrhenius a montré, dans une série de beaux travaux [1], que les gaz sont dissociés par cette radiation, et il attribue le surcroît de conductibilité aux ions libres qui se trouvent alors répartis dans la masse. Si les radiations de faible longueur d'onde exercent une action chimique sur les gaz, il est naturel que ceux-ci les absorbent en notable quantité, et c'est peut-être la raison pour laquelle on ne trouve pas, au fond de l'atmosphère, de radiations de très faible longueur d'onde dans le spectre solaire.

En résumé, les vibrations rapides de l'éther communiquent aux particules matérielles une énergie cinétique souvent suffisante pour en détruire la cohésion. Cette action est particulièrement énergique lorsque le corps possède une charge d'électricité négative.

Nous ajouterons que cette propriété des radiations ultra-violettes est partagée à un certain degré par la lumière ordinaire, à la condition que le récepteur y soit sensible. MM. Elster et Geitel ont trouvé que les métaux alcalins sont dans ce cas.

Ces propriétés, caractéristiques de certaines radiations, jouent probablement un rôle très important dans les phénomènes que nous étudierons plus loin; elles donneront peut-être le moyen de décider entre les diverses théories que l'on a proposées pour expliquer l'existence des rayons de M. Röntgen.

8. **Analogies acoustiques.** — Il est certains phénomènes, peu accessibles au calcul, que l'on peut élucider partiellement par une analogie suffisamment serrée: c'est ainsi que

[1] SV. ARRHENIUS, *Ueber das Leitungsvermögen der phosphorescirenden Luft* (*Mémoires de l'Académie des Sciences de Suède*, t. XIII, 14 sept. 1887). — *Ueber das Leitungsvermögen beleuchteter Luft* (*Ibid.*, 11 janvier 1888).

les phénomènes de l'Acoustique, dans l'étude desquels on opère sur des longueurs mesurables, permettent de prévoir en gros les transformations que les particules matérielles feront subir aux vibrations de l'éther qui produisent la lumière. Sans doute, l'analogie n'est pas complète, puisque les ondes sonores sont longitudinales et les ondes lumineuses transversales. De plus, il y a similitude parfaite entre l'énergie que dissiperont les particules moléculaires et celle qu'elles reçoivent d'un faisceau lumineux, tandis que les parcelles de matière qui absorbent les vibrations de l'air sans les transmettre dégradent l'énergie et la dissipent sous une forme différente de celle qui les a mises en mouvement. Malgré cela, l'analogie est encore assez serrée pour que l'on puisse tirer quelque bénéfice de son étude.

Considérons un système matériel composé d'un grand nombre d'organes semblables — des timbres d'appel, par exemple, — susceptibles de vibrer sans qu'un amortissement sensible se produise par consommation d'énergie dans leur masse. Si un son continu frappe l'ensemble, chacun des corps qui le composent se mettra à vibrer suivant sa période propre, et l'amplitude de la vibration sera d'autant plus grande que cette période sera plus voisine de celle de la source. Supposons que le milieu soit excité à l'unisson des timbres qui le composent; chacun d'eux prendra un mode vibratoire dont l'amplitude augmenterait jusqu'à la rupture, si, à leur tour, ces timbres ne communiquaient à l'air une portion de leur énergie. Si la vitesse de la transmission à l'intérieur de chacun de ces timbres est inférieure à la vitesse de propagation du son dans l'air, cette dernière ne sera que peu affectée par la traversée de l'ensemble. Mais, si cette vitesse est plus grande, le mouvement s'accélérera en traversant le milieu artificiel, et il en résultera une plus grande vitesse du son au travers de

l'ensemble qu'à l'air libre. L'expérience ne serait pas trop difficile à réaliser. Elle donnerait une image très exacte de ce qui se passe lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique traverse un corps qui l'absorbe par résonance. Nous avons vu qu'alors la vitesse de propagation du mouvement lumineux peut être augmentée, sans cependant l'être toujours (**6**).

Les phénomènes sont sensiblement différents lorsque l'onde sonore traverse un milieu composé d'un gaz et de particules solides peu élastiques et n'ayant pas un mode vibratoire bien défini. Un espace ainsi constitué sera optiquement l'analogue d'un milieu trouble, ou même d'un ensemble de molécules, si les vibrations de l'éther ont une très faible longueur d'onde. Si les corps ainsi disséminés dans l'espace n'en occupent qu'une très faible partie, la vitesse du son n'en sera pas affectée. En revanche, elle sera modifiée si les particules étrangères occupent, dans l'air, une portion importante de l'espace total.

Un physicien russe, M. Hesehus, a cherché à déterminer les modifications que subit le son à la traversée d'un milieu de ce genre [1]. Le mode d'investigation consistait à déterminer la distance focale d'une lentille en treillis de fil de fer, remplie de copeaux d'ébonite que l'on pouvait tasser plus ou moins. L'expérience a montré que la vitesse du son était modifiée d'autant moins que la longueur d'onde était plus petite. Pour les grandes longueurs d'onde, le milieu, qui est, de sa nature, indifféremment absorbant, agit comme s'il était continu, et la propagation ne se fait pas. Au contraire, lorsque la longueur d'onde diminue, les inégalités du milieu deviennent apparentes, et la pro-

---

[1] HESEHUS, *Sur la réfraction et la vitesse du son dans les corps poreux* (*Journal de la Société physico-chimique russe*, t. XXII, p. 233; 1890).

pagation se fait dans les interstices pleins d'air. Par exemple, lorsque la portion remplie par les copeaux est de 3 à 4 pour 100 du volume total, la vitesse de propagation des sons dont la longueur d'onde est de 24^{mm} atteint 261^{m} par seconde. Elle tombe à 146^{m} par seconde pour une densité de 0,14 et une longueur d'onde de 60^{mm}.

La diminution de vitesse du son tend à s'annuler à mesure que diminuent la portion de l'espace occupée par le corps solide indifférent et la longueur d'onde de la vibration sonore. Autant qu'on peut en juger, le rapport des longueurs d'onde utilisées par M. Hesehus aux dimensions des particules solides comprises dans l'espace en expérience est du même ordre de grandeur que celui des longueurs d'onde du spectre visible ou ultra-violet aux dimensions moléculaires. Le rapport des pleins aux vides dans les corps est plus difficile à déterminer; mais l'opinion la plus répandue est que la molécule proprement dite n'occupe qu'une petite partie de l'espace qui la sépare des molécules voisines.

9. Phosphorescence et fluorescence. — Les phénomènes lumineux singuliers que présentent certains corps dans des conditions particulières, et auxquels M. E. Wiedemann a donné le nom général de *phénomènes luminescents,* jouent un rôle important dans l'ensemble des radiations récemment découvertes.

Dans une enceinte fermée et isotherme, tous les éléments de surface ont le même éclat, à la condition qu'aucun d'eux ne présente des propriétés luminescentes. D'après le principe de Prévost, complété par Kirchhoff (*voir* **5**), cet éclat est même indépendant du pouvoir émissif de chaque élément de la surface interne de l'enceinte. Il n'en est pas de même lorsque celle-ci contient un corps luminescent. Ce dernier se détache de son entourage par une teinte dif-

férente correspondant à un déplacement de la répartition de l'énergie dans le spectre.

La luminescence peut être ramenée à deux groupes bien distincts de phénomènes. D'une part, certains corps, excités par la lumière ou par d'autres agents, sont sujets à se décomposer partiellement comme nous venons de le voir. Ils tendent alors à revenir à leur état d'équilibre en donnant naissance à des ondes lumineuses. Ils émettent ainsi des radiations pendant tout le temps que dure leur retour aux liaisons rompues par l'agent extérieur. Les corps susceptibles de donner naissance à ces phénomènes sont dits *phosphorescents*. Ils sont caractérisés par le fait que leur émission dure un temps appréciable après que l'excitation a cessé de se produire.

D'autres corps transforment immédiatement l'excitation qu'ils reçoivent en une vibration d'une nature différente. Leur molécule, sans éprouver de décomposition, participe au mouvement lumineux et change sa nature. La durée d'extinction ne dépasse pas alors le temps que met la molécule à reprendre ses mouvements ordinaires après la fin de l'excitation. Cette durée de l'extinction est tellement courte qu'elle n'a pas pu être mise en évidence. Les corps qui transforment ainsi la lumière sont dits *fluorescents*.

La distinction, en apparence artificielle, entre les corps ayant une durée d'extinction appréciable et ceux pour lesquels elle est au-dessous de toute durée mesurable a été établie par E. Becquerel. Nous voyons que cette classification des phénomènes correspond, en réalité, à deux classes bien tranchées de modifications dans la molécule.

La phosphorescence est surtout importante dans les corps faciles à décomposer. Certains sels sont dans ce cas; mais on peut augmenter beaucoup le phénomène en facilitant la décomposition des corps sous l'action de l'agent

excitant. L'un des meilleurs procédés consiste à faire ce que M. Van t'Hoff nomme une *solution solide*, c'est-à-dire un mélange intime de deux sels, dont l'un, ajouté en très faible quantité à l'autre, est prêt à se décomposer partiellement, et à former, avec une partie du second, une très petite proportion d'un troisième corps généralement moins stable que les deux premiers.

On peut, par exemple, obtenir un corps phosphorescent de cette nature, en mélangeant un peu de sulfate de magnésie à du sulfate de calcium. Pour cela, on commence par dissoudre le premier de ces corps dans de l'acide sulfurique, qui sert ensuite à précipiter une solution de chlorure de calcium. Dans certains cas, il est préférable de dissoudre les deux corps que l'on veut mélanger, et de faire évaporer la solution.

Souvent, le troisième corps formé est assez stable pour se conserver indéfiniment à la température ordinaire; on provoque alors sa décomposition en chauffant le sel, et le retour au premier état est généralement accompagné d'un dégagement abondant de lumière.

La manière dont se comportent les mélanges artificiels de deux substances solides conduit à penser que, dans un grand nombre de cas, les corps phosphorescents ne doivent cette propriété qu'à la présence de traces d'un autre corps dans la masse. On a pu déceler fréquemment, du reste, l'existence du corps répandu dans le dissolvant.

L'excitant le plus ordinairement employé pour produire la luminescence des corps est la lumière visible ou ultraviolette. Mais les rayons cathodiques, que nous allons étudier, produisent des effets beaucoup plus énergiques [1].

---

[1] On doit à M. E. Wiedemann une série d'études du plus haut intérêt sur l'ensemble de la question. Dans plusieurs Mémoires récents, M. Wiedemann donne le résultat de l'examen d'un grand nombre de corps présen-

La fluorescence, ou réflexion épipolique, découverte par Brewster, a été étudiée surtout par sir G.-G. Stokes. On sait que les spectres d'émission des corps solides possèdent un maximum d'énergie qui se déplace vers les faibles longueurs d'onde, à mesure que la température de la source s'élève. Si la réflexion épipolique se produisait de manière à diminuer toutes les longueurs d'onde de la vibration primaire, l'énergie étant conservée dans les radiations, la température virtuelle de la radiation serait augmentée ; donc, suivant le principe constant de la dégradation, ou de l'augmentation de l'entropie, la transformation doit se faire en remontant vers les grandes longueurs d'onde. C'est ce qu'avait trouvé Stokes, et l'on put croire un moment que cette règle était tout à fait générale ; elle a été contestée depuis lors par M. Lommel, qui en a fait une étude expérimentale et théorique.

L'application que l'on avait faite du principe de Carnot n'était peut-être pas parfaitement correcte. Si, dans l'ensemble des radiations transformées, il s'en trouve dont la longueur d'onde est plus grande que celle de la radiation incidente, il se produit dans le cycle une dégradation qui peut compenser l'augmentation du potentiel d'une partie de la radiation. Nous reviendrons plus tard à cette idée.

---

tant des phénomènes de phosphorescence. Quelques-uns de ces corps avaient déjà été étudiés par M. Lecoq de Boisbaudran.

La lumière développée est particulièrement brillante pour les sulfates ou les carbonates des terres alcalines, additionnés d'une petite quantité des sels correspondants d'un métal tel que le cuivre, l'urane, le manganèse, la magnésie. Les effets les plus brillants sont obtenus soit directement avec des sels de chaux additionnés de manganèse, soit seulement par une élévation de la température. Ces études prennent en ce moment une grande importance pratique, en connexion avec l'observation des rayons de Röntgen. [*Voir* E. WIEDEMANN et G.-C. SCHMIDT, *Ueber Luminescenz* (*Annales de Wiedemann*, t. LIV, p. 604) ; *Ueber Luminescenz von festen Körpern und festen Lösungen* (*Ibid.*, t. LVI, p. 201)].

10. L'énergie et la vision. — La petitesse des actions chimiques qui se produisent dans la plupart des corps phosphorescents a pu faire douter de la théorie que nous venons d'exposer. Cependant, si l'on compare l'énergie dégagée par les actions chimiques les plus ordinaires à celle qui est nécessaire pour impressionner un œil reposé, on arrive à la conclusion tout opposée.

D'après les mesures de M. Tumlirz, une bougie envoie, à 1^m de distance, sur une pupille de 3^{mm} d'ouverture, une quantité d'énergie du spectre visible qui atteindrait une petite calorie en 450 jours. A 12 kilomètres, cette bougie aurait l'éclat d'une étoile de sixième grandeur, et serait à la limite de visibilité ; à cette distance, elle fournirait à la pupille une petite calorie en 180 millions d'années. Certaines lumières phosphorescentes, mieux utilisées, possèdent, pour une énergie égale, un pouvoir éclairant cinq ou six fois plus considérable. Donc, l'énergie de la vibration de l'éther, suffisante pour donner pendant un an, à un œil reposé, la sensation lumineuse, ne serait pas supérieure à un milliardième de petite calorie.

1 gramme de charbon donnant, par sa combustion, plus de 8000 petites calories, il suffirait, pour nous procurer la sensation lumineuse pendant une seconde, de l'énergie fournie par la combustion, convenablement utilisée, d'une masse de charbon de 1 gramme divisé par un nombre de 20 chiffres.

La sensibilité de la plaque photographique est du même ordre de grandeur.

CHAPITRE III.

L'ÉLECTROLYSE.

11. Liquides. — Pendant longtemps, la conduction électrolytique parut liée à l'état liquide, dans lequel elle a été le plus étudiée. Dans ces dernières années, ce phénomène a été trouvé aussi dans les solides et dans les gaz, comme nous le verrons tout à l'heure.

La théorie primitive de Grotthus, qui admet l'échange des atomes entre les molécules voisines, a été complétée et modifiée par les idées de Van t'Hoff et d'Arrhenius, qui ont introduit cette notion de la dissociation électrolytique, et de l'existence d'ions libres dans la solution. Nous renverrons, pour le développement de cette théorie, à laquelle nous n'emprunterons que l'idée fondamentale, aux nombreux Mémoires publiés depuis quelques années surtout, par les chimistes de l'École de Leipzig.

Nous nous bornerons à rappeler ici, à propos de l'électrolyse des liquides, une curieuse expérience de M. Arons [1].

Si l'on place, en travers d'une auge électrolytique, une plaque de verre percée d'un trou, on n'observe aucune diminution du courant lorsqu'on ferme l'ouverture par une feuille de métal très mince.

Les recherches poursuivies par M. Daniel ont renseigné

[1] L. ARONS, *Versuche über elektrolytische Polarisation* (*Société de Physique de Berlin*, séance du 11 mars 1892).

très complètement sur la valeur de la polarisation sur les deux faces de la feuille de métal pour diverses épaisseurs et différentes densités de courant [1].

Dans l'eau acidulée, la feuille d'or ne montre aucune polarisation lorsque son épaisseur est inférieure à $0^{\mu},4$. De même, la feuille de platine jusqu'à 2^{μ}, la feuille d'aluminium jusqu'à $0^{\mu},5$, même pour une densité de courant de 0,1 ampère par centimètre carré, ne se polarisent pas. Pour les épaisseurs un peu supérieures à celle où la polarisation commence à se faire sentir, son intensité est proportionnelle à la densité du courant.

Ces expériences nous montrent que l'équilibre s'établit à travers un septum suffisamment mince de métal, et, suivant les idées actuelles sur l'électrolyse, on en conclura que les ions traversent sans résistance appréciable une faible épaisseur des métaux étudiés. Lorsque la couche augmente, la traversée devient plus difficile, mais elle est loin d'être complètement empêchée par des épaisseurs bien mesurables. Ainsi, pour une intensité de courant de 0,004 ampère par centimètre carré, la force électromotrice de polarisation aux deux faces d'une feuille d'or de 4^{μ} n'est que de 0,37 volt.

12. Solides. — Il n'existe aucune démarcation bien tranchée entre l'état solide et l'état liquide. Certains corps, comme la glu marine, pourraient, avec autant de raison, être rangés sous l'un ou l'autre des deux états; le plomb est plus franchement solide, et le cuivre présente une cohésion encore plus grande; cependant, Tresca a montré que

[1] S. Daniel, *Ueber galvanische Polarisationserscheinungen an einer dünnen metallischen Scheidewand in einem Voltameter* (*Annales de Wiedemann*, t. XLIX, p. 281; 1893).

ces corps se comportent absolument comme les liquides sous une pression un peu forte.

D'une manière générale, l'état solide ou liquide n'est défini que si l'on indique la pression sous laquelle on envisage le corps en question. Lorsque les efforts deviennent très considérables, la cohésion des corps que nous considérons comme solides n'intervient pas plus que la cohésion de l'eau soumise à l'action de la pesanteur. C'est pour cela qu'il est oiseux de se demander si l'intérieur de la Terre est solide ou liquide; quelle que soit sa composition, il est forcément liquide, eu égard aux pressions auxquelles il est soumis.

D'ailleurs, les molécules des corps éprouvent des déplacements considérables, tout autres que des oscillations sur place, comme on le croit communément. M. Walthère Spring a formé des alliages dans une couche d'une certaine épaisseur au contact de deux métaux, bien au-dessous du point de fusion de chacun d'eux; il se produit, à la surface de contact, une pénétration réciproque qui fait disparaître toute limite tranchée entre les deux blocs primitivement séparés. M. Roberts-Austen a trouvé, de même, que l'or se diffuse dans le plomb bien au-dessous de la température de fusion de ce métal.

Il n'est pas surprenant dès lors que, par l'emploi de forces agissant dans une direction déterminée, on obtienne un transport de matière, comme dans l'électrolyse du verre pratiquée par M. Foussereau, M. Warburg, M. Barus, M. Roberts-Austen.

L'expérience est facile à réaliser; on remplit de mercure ou d'acide sulfurique une éprouvette de verre que l'on place dans un bain de même nature; pour augmenter la mobilité des molécules, on porte le tout à une température élevée, mais bien inférieure à la fusion du verre, 100°

ou 200° par exemple. Le courant électrique traverse sans peine les parois de l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il se soit formé, du côté positif, un dépôt de silice qui devient absolument isolant lorsqu'il atteint une certaine épaisseur. En revanche, l'expérience peut se prolonger indéfiniment lorsqu'on remplace, à l'anode, le mercure par un amalgame alcalin; la surface du verre se dépolarise alors et cesse d'isoler.

Toutefois, il faut, pour que l'expérience réussisse, que l'alcali ajouté au mercure n'ait pas un volume atomique plus considérable que celui de l'alcali du verre; dans le cas contraire, son passage est assez difficile. Si son volume atomique est plus faible, le verre perd de sa transparence et de sa cohésion.

M. Barus a trouvé que, en exerçant une traction longitudinale sur l'éprouvette, sa conductibilité augmente dans le sens de l'épaisseur; on en conclut que les atomes se fraient plus facilement un passage à travers la masse, lorsque, par un moyen quelconque, on augmente la distance des particules de matière entre lesquelles elles doivent passer [1].

13. Gaz. — On s'est peu occupé jusqu'à ces derniers temps de l'électrolyse des gaz et des vapeurs. L'expérience présente, en effet, quelques difficultés, en raison du mélange spontané qui se produit rapidement par diffusion des produits de l'électrolyse. On doit au professeur J.-J. Thomson d'importants travaux sur cette question d'une grande actualité. Nous en extrairons deux expériences typiques

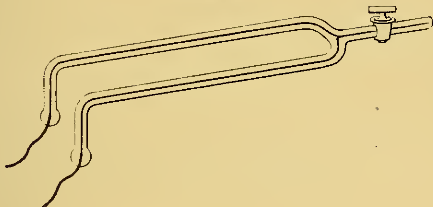
---

[1] Carl Barus, *Résistance électrique du verre comprimé* (*Journal de Physique*, t. IX, p. 522, analyse par M. B. Brunhes). — Ch.-Éd. Guillaume, *La résistance électrique du verre soumis à une déformation mécanique* (*Ibid.*, t. X, p. 39; 1891).

que nous décrivions, il y a quelques mois, dans les termes suivants [1] :

« Un tube en U, d'une ouverture aussi faible que possible, reçoit le gaz à examiner. Les extrémités de ce tube, recourbées à angle droit (*fig.* 2), de manière à rester parallèles entre elles, portent les électrodes, et peuvent être

Fig. 2.



amenées dans le champ d'un spectroscope, qui servira à l'analyse des produits de l'électrolyse. La décharge est fournie par une bobine de Ruhmkorff.

» Prenons comme type des expériences, celles qui ont été faites sur l'acide chlorhydrique; elles présentent l'avantage de donner deux spectres bien nets, l'un rouge, correspondant à l'hydrogène, l'autre vert, produit par le chlore.

» Le gaz étant à une faible pression dans le tube, les premières décharges l'éclairent en gris verdâtre, puis, peu à peu, le phénomène change, l'anode s'entoure d'une auréole d'un beau vert, tandis que le gaz prend une teinte rouge autour de la cathode. L'intensité des deux colorations augmente graduellement, puis les deux couleurs pénètrent l'une dans l'autre, s'estompent, et finalement la

---

(1) *Travaux récents en Électricité* (analysés dans l'*Industrie électrique* du 25 décembre 1895).

teinte rouge domine dans toute la longueur du tube, montrant qu'il s'est produit une diffusion, et que l'hydrogène participe seul à la décharge.

» Une autre expérience, dont le résultat est en quelque sorte contraire à celui que nous venons d'indiquer, consiste à introduire d'abord de l'hydrogène pur dans un tube, en vérifiant que son spectre s'y trouve seul, sans aucune trace d'un spectre étranger; puis à ajouter au contenu du tube une très petite quantité de chlore. Au bout d'un instant, les décharges révèlent la présence du chlore à l'électrode positive, tandis que l'autre ne montre que le spectre de l'hydrogène. En renversant le courant, on voit les spectres se fondre l'un dans l'autre, après avoir brillé pendant quelques secondes d'un vif éclat, et enfin, les gaz ont échangé leurs places respectives par transports opposés. Ce renversement peut se reproduire un nombre de fois indéfini.

» Ces deux expériences, diffusion des produits de l'électrolyse, et transport constant des gaz introduits séparément dans le tube, nous montrent que ces corps existent à deux états différents suivant leur provenance. »

Les faits que nous venons d'énumérer nous enseignent en résumé, que les corps peuvent être électrolysés, quel que soit leur état d'agrégation, et que, sous certaines influences particulières, les solides sont aisément traversés par des particules matérielles. Les ions libres, en particulier, voyagent sans difficulté au travers des corps les plus imperméables.

SECONDE PARTIE.

CHAPITRE IV.

LES DÉCHARGES DANS LES GAZ, PREMIÈRE PÉRIODE.

14. Phénomènes lumineux dus aux décharges dans les gaz raréfiés. — On doit à Faraday [1] les premières recherches systématiques sur les phénomènes qui accompagnent le passage de l'électricité à travers un gaz sous faible pression. Ces expériences ont été souvent répétées, avec divers dispositifs, et en employant soit le courant des machines statiques, soit celui de fortes batteries de piles, soit, surtout, les décharges d'induction fournies par les bobines.

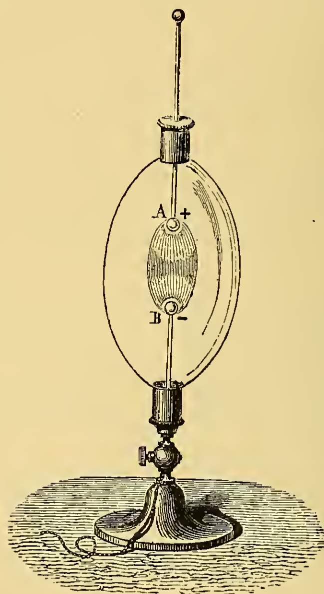
Lorsqu'on met les deux bornes A et B de l'appareil (*fig.* 3) en communication avec une source d'électricité de très haut potentiel, on voit, sous la pression ordinaire, éclater, entre les boules, des étincelles dont la fréquence dépend du débit de la source. Si l'on abaisse graduellement la pression, les étincelles diminuent d'éclat en même

---

(1) FARADAY, *Experimental Researches*, 13e série, 1838.

temps que leur fréquence augmente. Peu à peu, elles se transforment en aigrettes d'apparence continue, qui disparaissent à leur tour pour faire place à de simples lueurs entourant les deux pôles. Généralement, ces lueurs sont de couleurs différentes, comme nous l'avons déjà indiqué à

Fig. 3.



propos de l'électrolyse des gaz. Elles se distinguent encore par une autre propriété mise en évidence par Hittorf : la lueur négative communique seule au verre qu'elle rencontre un éclat particulier qui peut être très vif.

Dès l'année 1843, Abria porta son attention sur une particularité de la décharge qui resta longtemps mystérieuse. Dans la plupart des cas, la lueur qui se produit dans le

tube est divisée en strates, équidistants dans les tubes cylindriques. M. Spottiswoode et, après lui, M. Fernet appliquèrent à ce phénomène le procédé d'investigation du miroir tournant, qui permit d'étudier leur mouvement. Il fut ainsi possible de déceler l'apparence stratifiée de la décharge même dans le cas où le tube semblait, à la vue simple, rempli d'une lueur uniforme.

Gassiot observa le même phénomène en se servant d'une pile de 3520 éléments remplis d'eau de pluie. Hittorf, en revanche, le fit disparaître par l'emploi d'une batterie de 1600 éléments Bunsen [1]. Les divisions du tube reparaissaient lorsqu'on intercalait, dans le circuit, une très forte résistance. Elles devenaient particulièrement nettes lorsqu'un condensateur était mis en dérivation sur le tube. Hittorf en conclut que les stratifications sont dues à des interruptions du courant produites par un défaut de débit de la source.

La même question fut étudiée plus tard par Hertz [2], qui a décrit ses expériences dans un Mémoire auquel nous reviendrons au Chapitre suivant. Opérant avec une batterie de 1000 accumulateurs, il reconnut, par plusieurs procédés, que la décharge était parfaitement continue.

L'une des méthodes d'investigation employées par Hertz consistait à mettre simultanément, dans le circuit du tube, un galvanomètre et un électrodynamomètre, que l'on fermait ensuite sur une forte résistance métallique; on ramenait le galvanomètre à sa première indication et l'on

---

(1) Hittorf, *Ueber die Electricitätsleitung der Gase* (*Annales de Poggendorf*, t. CXXXVI, p. 1; 1869. — *Jubelband*, p. 430; 1874. — *Annales de Wiedemann*, t. VII, p. 553; 1879).

Voir aussi dans les *Annales de Chimie et de Physique* (4e série, t. XVII, p. 487; 1869) l'analyse très étendue du premier Mémoire d'Hittorf, par Bertin.

(2) Hertz, *Versuche über die Glimmentladung* (*Annales de Wiedemann*, t. XIX, p, 782; 1883).

déterminait celle de l'autre instrument, qui s'est toujours trouvée identique à la déviation mesurée dans le premier circuit. Cette égalité est un indice non douteux de la constance du courant.

Dans d'autres expériences, Hertz plaçait, en dérivation sur le tube, un condensateur dans le circuit duquel un fil métallique était disposé de façon à ce que sa température pût être aisément mesurée. Le fil conserva sa température, d'où l'on conclut qu'il n'était pas traversé par un courant, comme cela se serait produit si la décharge avait été intermittente.

Lorsqu'on augmentait beaucoup la résistance du circuit, on apercevait des stratifications, et, au même instant, le tube commençait à donner un son musical. D'ailleurs, le passage de l'un à l'autre des modes de décharge est brusque, sans aucun état transitoire.

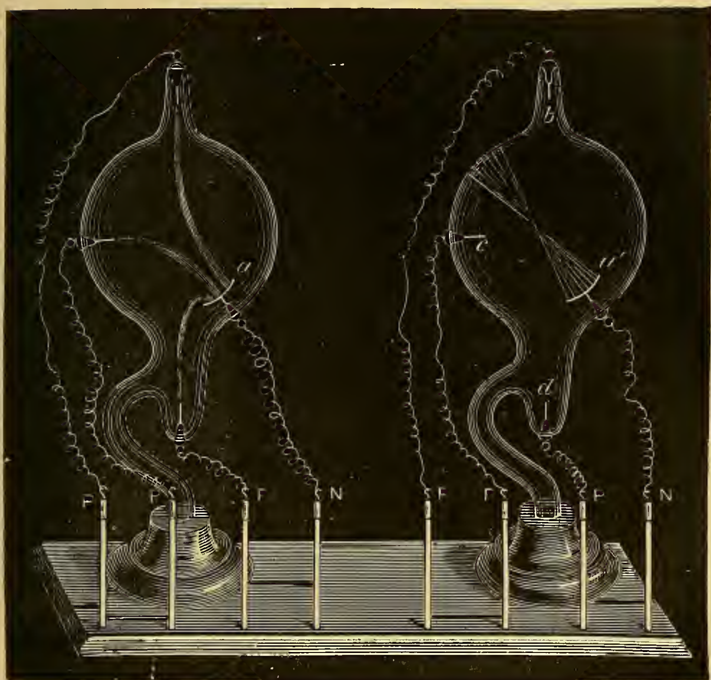
15. Cas des gaz très raréfiés. — C'est aussi à Hittorf que l'on doit les premières recherches sur les décharges dans les gaz sous très faible pression. Mesurant la résistance du circuit par un procédé particulier, il trouva que, au-dessous d'une certaine pression ($0^{mm},5$ pour l'hydrogène), cette résistance ne dépend plus de la distance des électrodes. On observe, en effet, que, pour ces pressions très faibles, la décharge qui reliait auparavant les électrodes part directement de la cathode.

Ce fait est une conséquence nécessaire du phénomène suivant : « La lueur négative est formée de rayons rectilignes, car un corps solide quelconque, isolant ou conducteur, l'interrompt sans l'infléchir et porte ombre sur les parois du tube. Sa direction est indépendante de la position de l'électrode positive. Ainsi, quand l'électrode négative est dirigée en sens contraire de la première, la lueur

bleue ne se recourbe pas pour se tourner vers le pôle positif [1] ».

Cette propriété de la décharge négative est rendue évi-

Fig. 4.



dente à l'aide de l'appareil que représente la *fig.* 4. A gauche, les trois électrodes filiformes sont en communication avec le pôle positif de la source, tandis que l'électrode en forme de cuvette reçoit le courant du pôle négatif. Sous une pression notable, la cathode *a* est reliée aux trois

---

[1]) Analyse de Bertin.

autres électrodes par des traits de lumière, tandis que, si la raréfaction a été poussée très loin, le flux partant de *a'* cesse de se diriger vers *b, c, d;* il s'échappe normalement à la cathode, et forme, sur le verre opposé, une tache lumineuse.

Hittorf a démontré du reste que la cathode joue, dans le phénomène, un rôle prépondérant. La résistance du tube dépend surtout de sa superficie et très peu de celle du pôle positif.

La formation de la lueur négative a donné lieu à de curieuses remarques. Lorsque, par exemple, les deux électrodes sont formées de fils qui débouchent en regard l'un de l'autre dans un étranglement du tube, la décharge se fait de préférence par un conduit latéral, si une portion quelconque des électrodes est comprise dans un espace ouvert communiquant avec ce conduit. Sinsteden et Gassiot avaient déjà observé que l'on fait disparaître la lueur lorsqu'on entoure la cathode d'un tube étroit ouvert vers l'intérieur de l'espace évacué.

16. Passage de la décharge dans un champ magnétique. — Davy observa, en 1821, que l'arc électrique est sensible à l'action de l'aimant; il prend la forme d'un dard comme celui d'un chalumeau, propriété utilisée, dans ces dernières années, pour diriger l'action calorifique de l'arc vers un point déterminé.

En 1849, A. de la Rive observa la même déviation de la décharge dans les gaz raréfiés; il donna à cette expérience une forme très démonstrative, en plaçant dans l'œuf électrique une tige de fer doux, que l'on aimantait à volonté à l'aide d'une bobine. La tige de fer est entourée, sauf à son extrémité, d'un tube de verre qui l'isole. L'effluve descend alors parallèlement à l'aimant et se met à tourner autour de lui lorsqu'il est excité.

MM. Sarasin et L. de la Rive ont analysé de près le phénomène. Ils ont montré aussi que la nappe lumineuse est capable de produire des actions mécaniques. Si l'on dispose, à l'intérieur de l'œuf, un moulinet à ailettes très mobiles, on le voit prendre un mouvement giratoire sous l'action de celui que l'aimant produit dans la décharge.

Hittorf a étudié le même phénomène dans les gaz très raréfiés. Il se servait, dans ce but, d'une ampoule sphérique, dans laquelle les électrodes débouchaient à angle droit. Il trouva que la lueur se déplaçait sous l'action de l'aimant, exactement suivant la loi de Laplace.

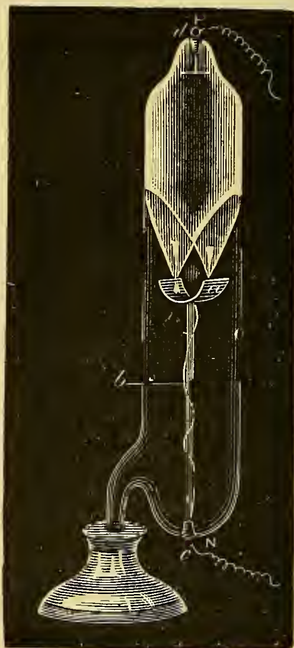
17. Expériences de M. Crookes. — C'est à M. Crookes que l'on attribue généralement la majeure partie des recherches de la première heure sur les décharges dans les gaz sous très faible pression. La raison de cette opinion réside dans le fait qu'il a donné à plusieurs de ces expériences une forme très propre à frapper l'imagination, et plus encore peut-être à l'idée théorique par laquelle il a cherché à relier les faits qu'il avait étudiés ([1]).

Nous venons de voir qu'un grand nombre des propriétés de la décharge dans les gaz très raréfiés avaient déjà été découvertes par Hittorf. M. Goldstein, dont nous analyserons plus loin les travaux, a aussi plusieurs antériorités importantes sur M. Crookes. Toutefois, comme, dans cette période de la plus grande production des deux savants physiciens, l'ordre chronologique est assez difficile à établir, nous analyserons successivement leurs travaux les plus importants.

([1]) W. Crookes, *On the Illumination of lines of molecular pressure, and the Trajectory of Molecules* (*Proceedings of the Royal Society*, t. XXVIII, p. 103, 30 novembre 1878.) L'ensemble des expériences de M. Crookes a été présenté à l'Association Britannique, en 1879. La plupart de ses Mémoires ont été analysés dans le *Journal de Physique*.

M. Crookes vérifia, par un grand nombre d'expériences, le fait que la décharge s'échappe de la cathode normalement à sa surface; ainsi, dans l'emploi d'une électrode négative cylindrique, la lueur qui frappe le verre (*fig.* 5)

Fig. 5.

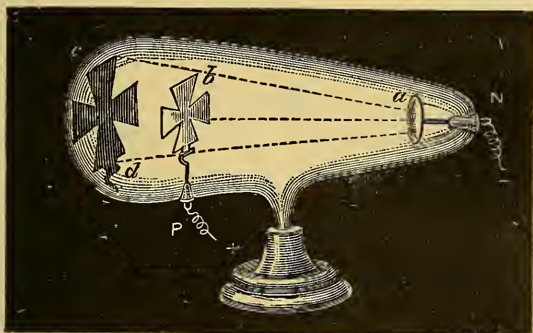


se compose d'une nappe limitée aux plans passant par l'axe du cylindre et ses génératrices extrêmes. Il donna à ses tubes des formes élégantes, très propres aux démonstrations publiques, comme celle de la *fig.* 6, où les rayons partis de *a* dessinent sur le fond *c* du tube (l'anti-cathode, comme le nomment MM. Benoist et Hurmuzescu) l'ombre *d* d'une croix servant d'anode.

M. Crookes a trouvé que les rayons échappés de la ca-

thode transportent une notable quantité d'énergie, qu'ils perdent en partie en frappant les obstacles. Ils sont susceptibles de produire une forte élévation de température, qui, dans le cas où leur foyer est de peu d'étendue, est suffisante pour fondre du platine. Les foyers qui se forment

Fig. 6.



sur la surface du verre le ramollissent et mettent le tube rapidement hors d'usage.

La décharge produit directement une action mécanique ; elle met en marche un moulinet porté sur deux paliers de verre (*fig.* 7), et fait même tourner par réaction un moulinet à axe vertical, par les ailettes duquel s'échappe la décharge négative ; il suffit pour cela qu'elles présentent une certaine courbure, ou qu'une de leurs faces soit isolante.

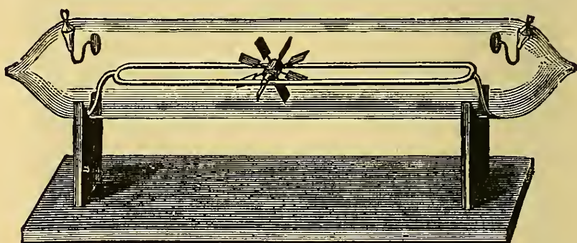
Les études spectroscopiques exécutées par M. Crookes à l'aide de tubes à vide sont aussi fort importantes. La matière qui reçoit les rayons partis de la cathode donne en général un spectre continu avec quelques raies plus brillantes ; parfois, il est franchement discontinu.

Les effets lumineux découverts par M. Crookes sont

parmi les plus frappants qu'il ait constatés. Dirigeant la décharge négative sur un certain nombre de corps phosphorescents, des sulfures alcalino-terreux, des cristaux, tels que le rubis ou le diamant, il leur communiqua un vif éclat indépendant du reste de leur température.

C'est dans la direction de ces dernières expériences que

Fig. 7.



M. Tesla et, après lui, plusieurs physiciens ont cherché la solution pratique de l'éclairage rationnel, par la production d'ondes uniquement lumineuses. A l'aide d'appareils spécialement étudiés en vue d'un grand rendement, M. Tesla a fait entrevoir la possibilité d'obtenir, par les procédés de M. Crookes, une lumière parfaitement appropriée aux besoins de l'éclairage.

18. Idées de M. Crookes. — Comme nous venons de le dire, les recherches de M. Crookes ont été guidées par une théorie précise, devenue rapidement populaire sous le nom de *Théorie du bombardement*.

L'éminent physicien pense que, dans le vide très poussé qu'il obtient dans ses tubes, les molécules gazeuses possèdent un degré de liberté suffisant pour que l'on puisse les envisager comme complètement indépendantes les unes des autres. Le vide parfait est isolant, comme l'avait

déjà démontré Masson; les recherches les plus récentes n'ont pu, du reste, que confirmer ce résultat déjà ancien; et, puisque la présence d'une petite quantité de matière est nécessaire à la conduction de l'électricité, M. Crookes en conclut que cette matière en est le support, et que la déperdition de l'électricité à la cathode est convective. Les molécules gazeuses sont attirées par l'électrode, se chargent et sont repoussées. L'élévation de température qui se produit au foyer de l'électrode est due au choc des particules, qui perdent, au contact, une partie de leur énergie cinétique.

La déviation par l'aimant achève de corroborer cette théorie; on sait, en effet, qu'un corps électrisé, animé d'un mouvement rapide, agit comme un courant, et se comporte de même sous l'action d'un aimant.

M. Crookes a exposé ses idées dans une lettre adressée à sir G.-G. Stokes, alors secrétaire de la Société Royale de Londres. Il nous semble intéressant d'en transcrire les passages les plus saillants (¹) :

« Considérons une molécule isolée dans l'espace. Est-elle solide, liquide ou gazeuse? Solide, elle ne peut pas l'être, parce que l'idée de solidité entraîne certaines propriétés qui n'existent pas dans la molécule isolée (²). En réalité, une molécule seule est une entité inconcevable, soit que nous essayions, comme Newton, de nous la représenter comme un corpuscule sphérique dur, soit que nous la considérions avec Boscovich et Faraday comme un centre

(¹) Crookes, *On a forth State of Matter* (*Proc. Roy. Soc.*, t. XXX, p. 469; 1880).

(²) Cette assertion de M. Crookes n'est peut-être pas parfaitement exacte. La théorie de l'association moléculaire, développée dans ces derniers temps surtout par M. Ramsay, admet, au contraire, que la molécule isolée peut varier en grandeur et former des conglomérats plus ou moins complexes; la molécule moyenne différerait suivant la température et l'état du corps; il se peut que la molécule isolée conserve cette propriété à un degré atténué; elle sera ainsi, par elle-même, apte à former, avec d'autres molécules de même espèce, un corps solide, liquide ou gazeux.

de force, soit enfin que nous adoptions l'atome tourbillon de sir William Thomson. Mais, si la molécule individuelle n'est pas solide, *a fortiori* elle ne peut pas être considérée comme liquide ou gazeuse, car ces deux états résultent de chocs intermoléculaires plus encore que l'état solide. La molécule individuelle doit, par conséquent, être classée pour son propre compte dans une catégorie spéciale.

» Le même raisonnement s'applique à un nombre quelconque de molécules contiguës, pourvu que leur mouvement soit dirigé de sorte qu'il ne se produise aucune collision.

»... Un souffle moléculaire peut toujours être envisagé comme le résultat du mouvement de molécules isolées, de la même manière que la décharge d'une mitrailleuse consiste en projectiles séparés.

» La matière, dans son quatrième état, est le résultat ultime de l'expansion des gaz; en raison de l'extrême raréfaction, la trajectoire libre des molécules est allongée au point que les chocs deviennent négligeables en comparaison du parcours total, et la plupart des molécules peuvent alors suivre leur propre mouvement sans être dérangées; si le chemin moyen est comparable aux dimensions du vase, les propriétés qui constituent l'état gazeux sont réduites à un minimum et la matière atteint l'état ultragazeux.

» Mais le même état de choses peut être obtenu si, par un moyen quelconque, nous isolons une quantité limitée de gaz et si, par une force extérieure, nous introduisons de l'ordre dans les mouvements apparemment désordonnés des molécules dans toutes les directions. »

19. Expériences de M. Goldstein. Ses objections. — Les premières publications de M. Goldstein sur le sujet qui

nous occupe datent de 1871 ; il est revenu à plusieurs reprises sur la question des décharges dans les gaz très raréfiés, notamment en 1876, avant les premières publications de M. Crookes dont il combattit les conclusions dans des travaux ultérieurs [1].

M. Goldstein a résumé ses premières recherches dans une série de propositions dont voici les principales :

La production de la lumière par les rayons électriques partis du pôle négatif dans un gaz très raréfié n'a lieu que lorsque ce rayon rencontre un obstacle solide.

Cette lumière ne se produit que lorsque le rayon est intercepté par l'obstacle.

Ainsi, un écran phosphorescent introduit dans le pinceau des rayons parallèlement à sa propagation ne donne aucune lueur appréciable.

La cause de la production de la lumière est purement optique [2].

Cette conclusion est déduite de l'identité de couleur que prennent les corps les plus divers soumis au « rayon électrique » et à la lumière du soleil ou à une source quelconque riche en radiations ultra-violettes.

Le caractère optique de ces radiations est confirmé, suivant M. Goldstein, par leur action photochimique ; ils noircissent le papier photographique, et agissent de même sur le bichromate de potasse, le chlorure d'argent et l'oxalate de fer.

---

[1] *Voir*, en particulier, le Mémoire d'ensemble de M. Goldstein, inséré dans les *Monatsberichte* de l'Académie de Berlin (janvier 1880).

[2] N'oublions pas que le Mémoire de M. Goldstein a été écrit avant que la théorie électromagnétique de la lumière fût populaire. Le mot « *optique* » est employé ici dans un sens restreint.

La transformation de l'extrémité des rayons se produit non seulement lorsqu'ils frappent la paroi fluorescente, mais en quelque endroit qu'ils rencontrent une substance solide.

Ainsi, le quartz ou le mica, qui ne s'illuminent pas sous l'action des rayons, rendent lumineux, par leur radiation, les corps phosphorescents placés dans leur voisinage, dès qu'ils coupent un faisceau de rayons électriques.

Enfin, en ce qui concerne la nature optique du phénomène : « *Il n'est pas douteux que, avec la lumière positive ou la lumière négative, nous avons affaire à une transformation de radiations très réfrangibles dont les vibrations sont changées en vibrations plus lentes, comme dans le phénomène de la phosphorescence et de la fluorescence.* Des expériences antérieures ayant montré que l'éclat des corps solides excédait la durée de l'excitation, j'ai été conduit à admettre que les apparences observées étaient dues au premier de ces phénomènes, et non au second, comme je l'avais dit d'abord. Parmi les nombreuses substances soumises à l'expérience, il n'en est aucune qui se soit montrée transparente aux radiations électriques, même sous une épaisseur aussi faible que possible. Ni des lames très minces de verre, ni des lames de spath ou de quartz, que M. Mascart a trouvées si transparentes pour les radiations très réfrangibles, n'ont laissé passer la moindre trace de ces rayons.

» La paroi d'un tube qui montrait une vive phosphorescence sous l'action des rayons fut recouverte de collodion à l'aide d'une goutte d'une solution éthérée très étendue. Même cette couche, dont l'épaisseur ne dépassait pas quelques centièmes de millimètre, projetait sur le verre une ombre noire comme de l'encre, tout comme si elle avait été formée d'une substance métallique opaque. Sans qu'il me soit possible de donner des valeurs numé-

riques, on peut conclure de ces expériences que la limite des radiations éthérées que l'on peut qualifier de lumière est au-dessous de celle qu'avait déjà indiquée M. Fizeau. »

On comprendra sans peine le grand intérêt que présentent les expériences de M. Goldstein. Ces propriétés de la lumière cathodique, qui sont traitées souvent dans son Mémoire au point de vue purement descriptif, deviennent très caractéristiques, considérées avec nos idées actuelles. On conviendra qu'il a frôlé de près la découverte toute moderne des applications pratiques de ces radiations.

Déjà en 1876, M. Goldstein avait étudié les ombres portées par les obstacles situés sur le trajet des rayons, et montré que, si ces écrans sont reliés à la terre ou à la cathode par un fil de très forte résistance, leur ombre s'élargit; il attribue ce phénomène à la répulsion qu'exerce la cathode sur les rayons cathodiques.

Dans un Mémoire d'ensemble publié postérieurement à ceux de M. Crookes, M. Goldstein apporte de nombreuses expériences dont le résultat semble nettement opposé aux idées du physicien anglais. Nous retiendrons deux arguments particulièrement importants; le premier est tiré de la théorie des gaz. Dans un tube de 90^{cm} de longueur, dans lequel la pression est de l'ordre du centième de millimètre, la paroi anticathodique brille encore d'un vif éclat. La théorie cinétique enseigne que le chemin moyen des molécules dans le tube en question était d'environ 6^{mm}. Le bombardement se serait donc propagé à une distance 150 fois plus grande que le parcours libre moyen. Or, la probabilité qu'une seule molécule traverse cet espace est de l'ordre de 10^{-65}; elle est pratiquement nulle, si grand que soit le nombre des molécules contenues dans le tube. C'est probablement à cette objection que répondait

M. Crookes dans la lettre dont nous avons donné quelques extraits, lorsqu'il disait que l'on peut produire artificiellement un état semblable à celui des molécules isolées en donnant au mouvement moléculaire une direction déterminée.

M. Goldstein conteste, du reste, la généralité du fait indiqué par M. Crookes, que les rayons s'échappent toujours normalement à la cathode. On peut, en effet, déplacer le foyer d'une cathode en forme de calotte sphérique, en intercalant des étincelles dans le circuit extérieur.

Un autre argument de M. Goldstein est tiré du fait que les rayons cathodiques ne présentent pas à un degré appréciable le phénomène de Doppler, c'est-à-dire le déplacement des raies spectrales qui est une conséquence nécessaire du mouvement des corps lumineux. Lord Kelvin [1] a répondu beaucoup plus tard à cette objection par un calcul approché, d'où il conclut que la vitesse des particules gazeuses, dans l'hypothèse de Crookes, est trop faible pour donner lieu à un déplacement mesurable.

Des expériences, sur lesquelles nous reviendrons, ont montré que le calcul de lord Kelvin, basé sur l'estimation de l'énergie perdue par les rayons sur les parois du tube, est certainement erroné; il avait fait entrer dans ce calcul la masse entière du gaz contenu dans le tube; nous verrons, au contraire (**21**), que le rayon cathodique ne forme qu'une faible partie de la décharge; les vitesses réelles des rayons sont ainsi très supérieures à celles que l'illustre physicien avait admises; nous verrons toutefois que la critique de M. Goldstein n'est pas sans réplique. Pour le moment, nous abandonnerons la discussion pour la reprendre lorsque

---

[1] *On the velocity of Crookes' cathode stream* (*Proceedings of the Royal Society*, t. LII, p. 331; 1892).

nous aurons décrit d'autres phénomènes découverts ultérieurement.

M. Goldstein est revenu fréquemment à ses études sur le phénomène cathodique. Il a vérifié, dans un nouveau travail, la diffusion des rayons frappant une surface quelconque, conductrice ou isolante, faisant ou non partie d'un circuit électrique; il a montré que, dans tous les cas, ces rayons réfléchis sont susceptibles de produire de la phosphorescence sur les corps qu'ils frappent ([1]). Toutefois, on voit, d'après le titre du Mémoire de M. Goldstein, qu'il considérait le phénomène comme une simple *réflexion diffuse,* et non comme une *transformation* de rayons d'une certaine espèce en une radiation d'un genre tout différent.

Nous dirons, en terminant, que M. Goldstein ([2]) a étudié le phénomène des rayons électriques en insérant dans un tube cylindrique une cathode qui le fermait exactement et portait un certain nombre de petites ouvertures; il a trouvé plusieurs différences importantes entre les radiations du côté de l'anode et celles qui se produisaient dans la partie opposée du tube. Ces dernières ne sont pas déviées dans un champ magnétique, et n'excitent pas, d'une manière appréciable, la luminescence du verre.

([1]) E. GOLDSTEIN, *Ueber die Reflexion elektrischer Strahlen* (*Monatsberichte* de Berlin, 1881, p. 775).

([2]) *Ueber eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Cathode inducirter Ladung* (*Ibid.*, 1886, p. 691).



CHAPITRE V.

LES DÉCHARGES DANS LES GAZ, DEUXIÈME PÉRIODE.

20. Coup d'œil sur la théorie des phénomènes. — Dans ses premiers Mémoires, Hittorf s'était tenu éloigné de toute discussion concernant la cause des faits qu'il avait découverts. Avec M. Crookes et M. Goldstein, la théorie se dessine et la lutte commence aussitôt.

Les expériences ont montré que quelque chose part de la cathode; le fait est incontestable. Mais, là, les opinions se bifurquent. Selon M. Crookes, l'agent mis en mouvement est matériel, tandis que, suivant M. Goldstein, il est une forme de l'énergie. On trouve parfois un bon argument pour l'une de ces deux opinions, mais les objections sont plus nombreuses encore. Cependant M. Crookes a une bonne avance. Son idée est précise, celle de ses adversaires n'est encore que vaguement dessinée. La source de matière n'est pas difficile à découvrir dans le tube. Il contient toujours un peu de gaz sans lequel le courant ne passe pas; et le tube une fois excité, la cathode fera au besoin tous les frais de l'expérience, puisque la lumière ultra-violette qui l'entoure la pulvérise abondamment.

D'autres faits, découverts par M. Goldstein, et que nous avons rapportés dans le précédent Chapitre, cadrent moins

bien avec les idées de M. Crookes. Nous allons voir les difficultés s'amonceler autour d'elles. L'habile et patient labeur de plusieurs physiciens allemands, parmi les plus distingués, les bat en brèche à toute occasion.

La théorie énergétique du phénomène se précise. En 1883, nous voyons apparaître, dans un Mémoire de M. E. Wiedemann ([1]), l'hypothèse que les *rayons cathodiques,* comme on les nommera désormais, sont composés de radiations de très faible longueur d'onde. Plus tard, M. Lenard vient à cette idée, qu'il exprime d'une façon plus dubitative, en disant que ces rayons se comportent, vis-à-vis de la molécule, comme les radiations lumineuses par rapport à un milieu trouble; il laisse ainsi le lecteur compléter sa pensée en réduisant simultanément, et dans la même proportion, la longueur d'onde et le milieu ambiant à des dimensions beaucoup plus faibles.

On aura dès lors une nouvelle base de discussion, et la théorie énergétique du phénomène pourra, à son tour, être attaquée sous une forme tangible.

On ne possède en réalité qu'un argument bien positif contre la théorie purement optique du phénomène : c'est la déviation des rayons cathodiques par l'aimant, mais cette seule propriété, complètement isolée, suffit pour rendre cette théorie fort douteuse.

C'est en grande partie pour cela que l'on vient, timidement d'abord, puis avec plus d'insistance, à l'idée de la vibration longitudinale de l'éther; ici, le terrain est neuf, et l'on peut disposer encore d'un nombre suffisant de coefficients pour donner à cette vibration plusieurs des propriétés des rayons cathodiques.

([1]) E. Wiedemann, *Ueber electrische Entladungen in Gasen* (*Annales de Wied.*, t. XX, p. 756; 1883). — E. Wiedemann et H. Ebert, *Electrische Entladungen in Gasen und Flammen* (*Ann. de Wied.*, t. XXXV, p. 209; 1888).

Cependant, dès le début, une idée nouvelle se fait jour, dont l'importance ne fera que grandir.

M. J.-J. Thomson fonde la théorie de la décharge dans le tube sur l'hypothèse de la dissociation du gaz [1].

L'énergie du champ électrique est absorbée par les molécules, qui se transforment en ions libres, et dissipent les charges électriques. Les relations connues entre la pression et la dissociation conduisent à penser que la conductibilité doit d'abord augmenter avec la première dilution du gaz; puis, lorsque les molécules existant dans le champ ne suffisent plus pour épuiser son énergie, la résistance augmente de nouveau pour devenir infinie dans le vide parfait. Cette théorie s'adapte très exactement aux faits d'expérience les plus évidents, et suffira pour en expliquer d'autres d'une nature plus délicate.

Cette théorie de M. J.-J. Thomson est bien d'accord avec une expérience relatée par Hertz, d'après laquelle la chaleur développée dans les tubes à vide est proportionnelle à l'intensité du courant, et non à son carré. L'éminent professeur de Cambridge pense, en effet, que le développement de chaleur est dû à la recombinaison des ions dissociés, dont le nombre est évidemment proportionnel à l'intensité du courant.

Nous marquerons au passage plusieurs faits d'une grande importance théorique, dans le résumé que nous allons essayer de donner des recherches de la deuxième période, celle de la lutte entre les deux théories.

21. Les actions électromagnétiques et électrostatiques des rayons cathodiques; réciprocité. — Dans les idées de

---

[1] J.-J. Thomson, *On a theory of the electric discharge in gases* (*Philosophical Magazine*, 5e série, t. XV, p. 427; 1883).

M. Crookes, l'action d'un champ magnétique sur les rayons cathodiques est identique à l'effet Rowland, dans lequel une particule électrisée animée d'un mouvement rapide agit comme un courant électrique (**3**). Si tel est le cas, il semble que l'action doive être réciproque.

L'action inverse des rayons sur un aimant a été étudiée d'abord par Hertz, à l'aide du dispositif suivant [1]. Dans un tube cylindrique, la cathode est percée en son centre, situé sur l'axe du cylindre; elle est traversée par un tube de verre contenant le fil positif qui en débouche au ras de la cathode. Dans ces conditions, les rayons cathodiques se produisent comme à l'ordinaire, normalement à l'électrode négative, tandis que, s'il existe un courant entre les pôles, il est centré sur l'axe du tube, et se ferme complètement de manière à n'exercer aucune action magnétique à l'extérieur. Un petit aimant, suspendu auprès du tube, dans le voisinage du passage des rayons cathodiques, n'éprouve aucune action mesurable, tandis qu'il accuse immédiatement une forte déviation si l'on prend comme anode un fil situé dans la portion du tube opposée à la cathode.

Hertz chercha ensuite à déterminer la marche du courant dans un conducteur à deux dimensions. Il construisit, pour cela, un tube plat, sorte de caisse, au-dessus de laquelle il traça les lignes de courant à l'aide d'un aimant très court, presque astatique, suspendu en un point fixe, tandis que l'on déplaçait le tube dans deux directions horizontales. Il obtint ainsi des courbes qui représentaient, pour plusieurs positions respectives des électrodes, les lignes de propagation de l'électricité. Dans tous les cas, l'anode était placée latéralement par rapport à la cathode, d'où

---

(1) HERTZ, *Versuche über die Glimmentladung* (*Annales de Wiedemann*, t. XIX, p. 782; 1883).

les rayons émergeaient normalement. Il trouva que les lignes de propagation croisent en tous sens les rayons, et que ceux-ci ne peuvent être envisagés comme les points de passage du courant. Hertz en conclut que la déviation des rayons, qu'il considère aussi comme dus à une vibration, tient à une modification de l'espace dans lequel ils se propagent, et nullement à une action directe de l'aimant.

On contournerait cette conclusion en admettant que les rayons ne forment qu'une petite partie de la décharge ; remarquons toutefois que le résultat de Hertz est en contradiction avec celui de Hittorf, qui avait trouvé dans les tubes une résistance indépendante de la distance des électrodes, dès que se forment les rayons cathodiques (**15**).

D'ailleurs, suivant Hertz, les rayons ne deviennent visibles que lorsque le mouvement auquel il les attribue rencontre une substance quelconque ; enfermant, dans un tube, une goutte de mercure, il la vaporise de façon à arrêter les rayons par un milieu gazeux relativement dense ; or, partout où les rayons rencontrent la vapeur, il se dégage une vive lueur qui pénètre seulement à une faible profondeur dans ce nouveau milieu.

Quelle peut être la modification du milieu éthéré invoquée par Hertz ? Il a été bien difficile de le dire jusqu'ici, et c'est là, comme nous l'avons vu, le point vulnérable de la théorie énergétique du rayon.

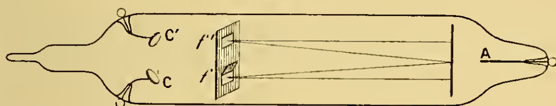
L'action du champ a été soumise à une étude approfondie par M. Lenard ; nous ne séparerons point cette question de l'ensemble de ses recherches sur les rayons cathodiques, dont nous rendrons bientôt compte (**22**).

M. Crookes avait conclu de ses recherches à une répulsion des rayons cathodiques parallèles, ce que l'on pouvait attribuer à un effet électrostatique des particules électrisées, supérieur à leur effet électrodynamique. Dans un

tube cylindrique, muni à une extrémité de deux cathodes, M. Crookes avait placé un écran de mica percé de deux fenêtres s'ouvrant en regard des cathodes; l'appareil était monté de telle sorte que, lorsqu'on les produisait séparément, les deux rayons venaient couper l'axe du tube près de l'extrémité où se trouvait l'anode. Lorsque, au contraire, on actionnait simultanément les deux cathodes, les deux rayons se redressaient et parcouraient le tube parallèlement à son axe.

MM. Wiedemann et Ebert [1] ont eu l'idée de disposer, devant l'une des fenêtres, un petit volet que l'on pouvait ouvrir ou fermer à volonté (*fig.* 8). L'expérience montra

Fig. 8.



que le rayon passant par la fenêtre f' n'était nullement influencé par le passage de l'autre rayon. Que la fenêtre f fût ouverte ou fermée, sa direction ne dépendait que de l'excitation de la deuxième cathode C. On serait en droit d'en conclure que la répulsion des rayons n'existe pas à un degré appréciable, et que le phénomène se borne à une réaction exercée par la cathode sur un rayon quelconque, émané d'elle-même ou d'une autre électrode négative. Sous cette forme, le phénomène avait déjà été décrit par M. Goldstein (**19**).

Cependant, certaines expériences anciennes conduisent à penser qu'il ne faudrait pas donner au résultat de MM. Wiedemann et Ebert une valeur trop absolue. Si les

---

(1) E. Wiedemann et H. Ebert, *Ueber die angebliche Abstossung paralleler Kathodenstrahlen* (*Annales de Wiedemann*, t. XLVI, p. 158; 1892).

rayons cathodiques n'exerçaient les uns sur les autres aucune action réciproque, ceux qui émanent d'une cathode en forme de calotte sphérique devraient converger en un point et diverger ensuite, de façon à donner en quelque sorte une image renversée de la cathode. Au contraire, M. L. Weber a montré, en 1880, qu'un écran placé sur le trajet des rayons, au voisinage de la cathode, donne, sur la paroi opposée, son ombre redressée. Il semble en résulter que les rayons forment un simple faisceau fortement étranglé, mais qui diverge sans qu'il se produise un croisement [1].

22. Les expériences de M. Lenard [2]. — Les expériences exécutées à Bonn par M. Ph. Lenard forment l'ensemble le plus important de recherches de la seconde période. Un nouveau moyen d'investigation avait été découvert par Hertz; alors que M. Goldstein avait cru pouvoir conclure de ses recherches que les corps, sous la plus faible épaisseur, étaient opaques aux rayons cathodiques, Hertz reconnut que ces derniers traversent des épaisseurs appréciables de divers métaux [3]. Ainsi, un morceau de verre d'urane, recouvert, du côté de la cathode, par une feuille d'or, présente les phénomènes de phosphorescence avec une intensité au moins égale à celle qu'on observe sans la feuille d'or; les rayons cathodiques peuvent, en effet, n'être que très peu

---

(1) L. Weber, *Bemerkungen zu den Crookes'schen Versuchen* (*Carl's Repertorium*, t. XVI, p. 240; 1880).

(2) Ph. Lenard, *Ueber Kathodenstrahlen von atmosphärischem Druck und im äussersten Vacuum* (*Annales de Wiedemann*, t. LI, p. 225; 1894). — *Ueber die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen* (*Ibid.*, t. LII, p. 23; 1894). — *Ueber die Absorption der Kathodenstrahlen* (*Ibid.*, t. LVI, p. 255; 1895). — *Voir* aussi l'analyse que nous avons donnée des travaux de M. Lenard dans *la Nature* (n° 1104; 28 juillet 1894).

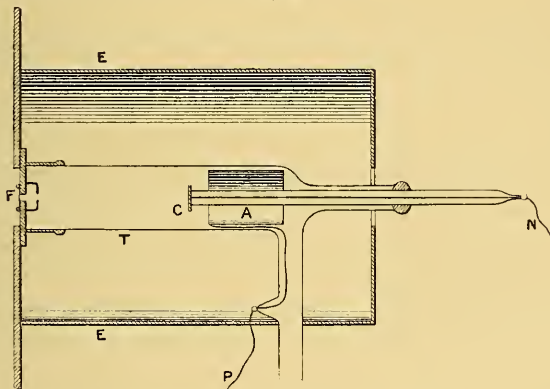
(3) H. Hertz, *Ueber den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten* (*Annales de Wiedemann*, t. XLV, p. 28; 1892).

affaiblis au passage du métal, tandis que la lumière engendrée dans le verre s'y réfléchit en majeure partie et produit un renforcement de l'éclat. De petits fragments de mica collés sur la feuille d'or projettent une ombre intense, mais qui se diffuse dans le verre.

MM. Wiedemann et Ebert [1] avaient reconnu, à la même époque, la transparence, pour les rayons cathodiques, d'un dépôt de platine formé à l'intérieur de l'ampoule et complètement opaque à la lumière.

Cette découverte de la perméabilité de minces feuilles de métal pour les rayons cathodiques permit à M. Lenard de

Fig. 9.



séparer entièrement l'étude des rayons des conditions de leur production. Fermant un tube par un septum métallique, il en fit sortir les rayons cathodiques, qu'il put étudier dans divers milieux, tandis que, jusque-là, ils étaient liés à un espace fortement évacué.

La *fig.* 9 représente le premier appareil de M. Lenard.

(1) E. Wiedemann et H. Ebert, *Ueber electrische Entladungen* (*Société physico-médicale d'Erlangen*, 14 décembre 1891).

La cathode circulaire C est placée dans l'axe du tube; l'anode est composée d'un cylindre A, centré de même sur le tube ; elle est située en retrait de la cathode. Le tube T lui-même n'est plus scellé, comme dans les précédentes recherches ; il est fermé par une armature percée en son centre d'une fenêtre F de $1^{mm},7$ de diamètre, sur laquelle on a collé une feuille d'aluminium de 3^{μ} d'épaisseur. Une capsule disposée à l'intérieur de l'armature protège la fenêtre contre les actions électrostatiques; l'appareil entier est enfermé dans une caisse en métal E, en contact avec l'armature, et mise à la terre.

Avec ce dispositif, il est aisé de reconnaître que les rayons sortent du tube par la fenêtre et se répandent dans l'atmosphère, où leur présence se révèle par les actions phosphorescentes déjà connues ([1]), et par plusieurs autres qu'il est désormais aisé de découvrir.

Pour l'étude optique du parcours des rayons, M. Lenard se sert d'un écran de papier de soie enduit de pentadécylparatolylcétone; ce sel donne une belle luminescence verte sans résidus appréciables; l'écran permet de reconnaître que les rayons se répandent dans l'air à plusieurs centimètres de la fenêtre, en une radiation fortement diffusée. Un grand nombre d'autres corps deviennent lumineux dans les mêmes conditions, et les expériences, qui peuvent maintenant s'étendre aux liquides, montrent la belle luminescence bleue du pétrole.

Les actions photographiques des rayons, que M. Goldstein avait déjà reconnues, se révèlent très énergiques; à une petite distance de la fenêtre, le papier sensible se noircit comme à la lumière d'un soleil légèrement voilé.

([1]) La fenêtre elle-même devient luminescente, dès qu'il s'est formé un peu d'alumine à sa surface.

Le nouveau dispositif permet enfin à M. Lenard de découvrir une action encore inconnue des rayons : le pouvoir de décharger rapidement les corps électrisés. Un électroscope placé dans le voisinage de la fenêtre se décharge instantanément, et l'action est encore sensible à 30^{cm} de l'appareil.

Le procédé d'investigation employé de préférence par M. Lenard était le procédé optique; moins sensible peut-être que les deux autres, il présente l'avantage d'être instantané. On observe, en effet, que, sous l'action des décharges, les tubes se modifient en un temps plus ou moins long, et il est indispensable, pour les mesures comparatives, de se servir d'un tube non altéré. Dans les expériences de mesure, M. Lenard n'opérait que pendant quelques secondes, ce qui, joint à l'exiguïté de sa fenêtre, l'a empêché de constater les effets surprenants découverts plus tard par M. Röntgen.

M. Lenard recommande aussi de mettre, en dérivation sur le tube, un excitateur à étincelles, qui permet de contrôler le degré d'évacuation par la distance explosive. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque cette distance était de 3^{cm}. D'ailleurs, le tube n'était jamais séparé de la pompe à mercure, de telle sorte que l'on pouvait revenir aux conditions initiales après chaque série d'expériences.

L'emploi de l'écran luminescent exige certaines précautions. S'il n'est pas protégé, du côté du tube, par un corps opaque, la phosphorescence de l'air, que l'on observe à travers le papier de soie, fausse le résultat. C'est pourquoi M. Lenard recouvrait son écran, vers l'arrivée des rayons, d'une mince feuille d'aluminium complètement opaque à la lumière ordinaire. Il attribue à cette précaution la précision de ses résultats.

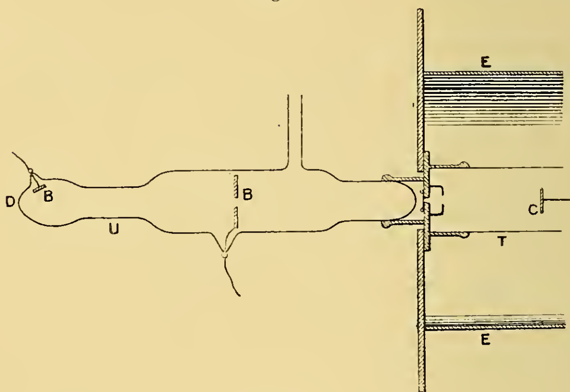
Nous avons vu que M. Goldstein avait trouvé complètement opaque aux rayons cathodiques une mince pellicule

de collodion. M. Lenard pense que ce résultat négatif est attribuable à l'abondance de la lumière dans le tube, qui masquait les faibles radiations émanées du verre à l'abri du collodion.

Outre l'appareil que nous venons de décrire, M. Lenard a construit deux autres tubes pour l'observation des rayons dans des milieux divers.

L'un d'eux, U (*fig.* 10), destiné aux observations dans un vide très parfait, portait des électrodes BB servant à contrô-

Fig. 10.



ler la pression par la résistance du gaz restant dans le tube. Il fut mastiqué en regard de la fenêtre du tube producteur, et permit de déterminer les lois de la propagation des rayons dans des conditions absolument indépendantes de leur nature.

Muni de ces appareils, M. Lenard a d'abord étudié l'absorption des rayons dans divers gaz; il put constater qu'ils se propagent dans le vide aussi parfait que puissent le produire les trompes à mercure, en prenant la précaution de condenser encore les vapeurs mercurielles par un mélange réfrigérant. Dans ces conditions, la production des rayons

est impossible, et M. Lenard en conclut qu'ils sont complètement indépendants de la matière gazeuse, puisqu'ils peuvent en être séparés.

La tache luminescente D était encore parfaitement nette à plus de 1ᵐ de la fenêtre, et correspondait exactement à la projection de l'ouverture de l'écran, la fenêtre étant le point d'émission.

Voici quelques-uns des résultats de M. Lenard, pour des rayons de même nature [1] :

	Pression. mm	Pouvoir absorbant.	Masse spécifique.		Quotient.
Hydrogène	3,30	0,00149	0,368	10^{-6}	4040
Air....................	0,78	0,00416	1,25		3330
Hydrogène	760 »	0,476	84,9		5610
Air....................	760 »	3,42	1,23	10^{-3}	2780
Anhydride sulfureux..	760 »	8,51	2,71		3110
Collodion.............		3310	1,10		3010
Papier		2690	1,30		2070
Verre		7810	2,47		3160
Aluminium...........		7150	2,70		2650
Mica..................		7250	2,80		2590
Feuille de clinquant..		23800	8,90		2670
Argent		32200	10,5		3070
Or....................		55600	19,3		2880
		Moyenne.............			3200

Les nombres de la dernière colonne sont remarquable-

---

(1) Soit i_0 l'intensité des rayons dans un milieu non absorbant à une distance 1 de la source. Dans un milieu absorbant, l'intensité à la distance r sera

$$i = i_0 \frac{e^{-ar}}{r^2}.$$

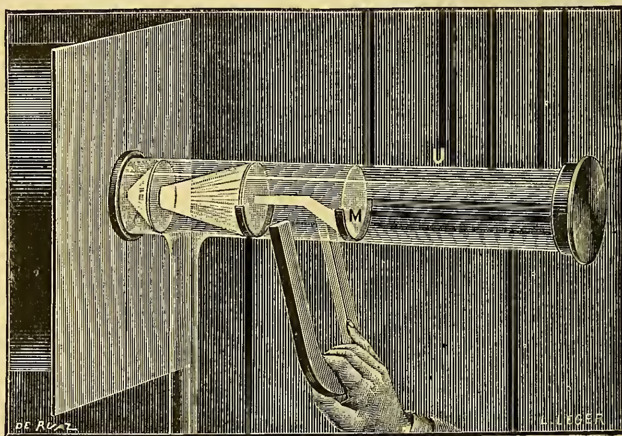
M. Lenard déterminait la distance R pour laquelle l'intensité I donnait une luminescence perceptible. La quantité $\frac{i_0}{I}$ étant considérée comme constante, on l'élimine à l'aide de l'équation relative au vide

$$I = \frac{i_0}{R^2}$$

On trouve alors a, en cm^{-1}, les longueurs étant exprimées en centimètres.

ment concordants, étant donnée surtout l'incertitude inévitable des observations. L'hydrogène seul possède un pouvoir absorbant relatif plus grand que les autres corps examinés par M. Lenard. A cette exception près, on peut dire, avec une assez grande approximation, que le pouvoir absorbant des corps pour ces rayons, que nous nommerons encore cathodiques, est proportionnel à leur masse spécifique.

Fig. 11.

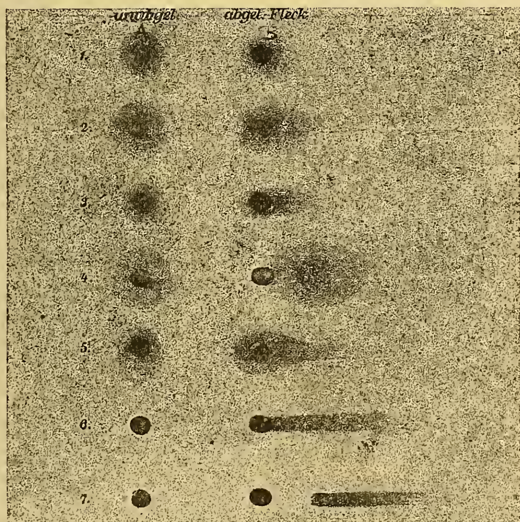


L'action du champ magnétique a donné lieu à des observations non moins intéressantes. Dans l'appareil qui a servi à ces recherches (*fig.* 11), le rayon, à sa sortie de la fenêtre, était limité dans le tube U par deux écrans successifs, et traversait le champ magnétique après son passage à travers l'ouverture du second. Les mesures préliminaires sur la tache lumineuse M ont été faites à l'aide de l'appareil que représente notre figure ; dans des recherches plus précises, le récepteur était placé contre l'une des parois du tube, et portait une échelle divisée.

La *fig.* 12, reproduite en fac-simile d'après le Mémoire de

M. Lenard, représente quelques-unes de ses observations. On voit, dans la colonne de gauche, A, une série de taches produites sur le récepteur par des rayons non déviés. Au centre d'un halo diffus, se distingue un contour parfaitement limité, à l'intérieur duquel la lumière, rendue ici en

Fig. 12.



noir, est particulièrement intense et à peu près uniforme. Deux de ces taches n'ont aucun halo.

La seconde colonne, B, montre le phénomène après le passage des rayons dans le champ magnétique. Ces taches présentent une particularité remarquable. Le halo seul est dévié, la lumière nettement délimitée n'est pas affectée par l'aimant. Parfois, la lumière diffuse se sépare entièrement de la tache; on peut même la faire apparaître là où rien ne la décelait dans l'image non déviée.

M. Lenard conclut de ces expériences que la diffusion et

la déviation sont deux propriétés communes aux mêmes rayons, et que ceux-ci peuvent les posséder à des degrés très divers. Il semble toutefois y avoir une démarcation bien tranchée entre des rayons possédant ces deux propriétés à un degré quelconque, et les rayons ne les possédant pas du tout. Nous discuterons plus loin cette idée.

Dans son premier Mémoire, M. Lenard décrit l'expérience suivante, qui prend aujourd'hui une grande importance : une plaque sensible était disposée *dans une boîte d'aluminium entièrement fermée*; sa moitié de droite était couverte d'une mince feuille d'aluminium, sa moitié inférieure, d'une lame de quartz de $0^{mm},5$, de sorte que le quart inférieur droit était protégé par les deux écrans.

On put constater que l'aluminium ne projetait qu'une ombre très faible; le quartz, au contraire, arrêtait absolument les rayons; toutefois, la lumière phosphorescente de l'air le traversait, et la plaque n'était indemne que sous les deux écrans.

23. Les rayons de décharge; expériences de M. E. Wiedemann. — Dans un travail présenté au Congrès de la *Société électrochimique* [1], dans sa session de juin 1895, M. Eilhardt Wiedemann décrit des expériences dans lesquelles il a été conduit à distinguer, dans l'ensemble des radiations émanées d'une étincelle ou d'une cathode, une nouvelle espèce de rayons doués de propriétés particulières. Un écran thermoluminescent, soumis à une chauffe préalable destinée à le débarrasser des dernières traces des modifications dues à des travaux antérieurs, est couvert partiellement d'une lame de quartz ou mieux encore d'une lame

---

[1] E. WIEDEMANN, *Ueber eine neue, in Funken und elektrischen Enttadungen, enthaltene Art von Strahlen (Entladungsstrahlen)* (*Zeitschrift für Elektrochemie*, n° 8, p. 159; 1895).

de spath fluor [1]. On expose ensuite le tout à la radiation d'une étincelle, ou bien on le dispose à l'intérieur d'un tube à vide ; on chauffe ensuite l'écran de manière à faire apparaître ses modifications. Les parties transformées brillent alors d'un éclat plus ou moins vif. Voici le résultat de ces expériences : Un grand nombre d'écrans thermoluminescents révèlent exactement la même transformation dans les parties nues et dans les portions protégées par le spath fluor ; quelques-uns, au contraire, restent absolument sombres aux endroits protégés, tandis qu'ils s'illuminent brillamment dans les portions demeurées découvertes. Les substances les plus remarquables à ce point de vue sont le sulfate, le carbonate ou le nitrate de calcium, additionnés d'une petite quantité des mêmes sels de manganèse.

« Ces expériences montrent que l'étincelle contient une espèce spéciale de rayons qui ne traversent pas le spath fluor; les décharges dans les gaz raréfiés donnent aussi naissance à ces rayons. *Je n'ai pas encore pu constater une action quelconque de l'aimant sur ces rayons.* »

L'idée de M. Wiedemann est que les nouveaux rayons sont produits par des mouvements tourbillonnaires de l'éther.

« L'observation des rayons de décharge, conclut-il, présente un intérêt général en ce qu'elle nous montre que, même dans des domaines souvent explorés, des formes encore inconnues de l'énergie, en quantité très appréciable, se cachent aussi longtemps qu'on n'a pas trouvé un mode d'observation capable de les déceler. »

Si les « rayons de décharge » de M. Wiedemann ne sont pas les rayons X de M. Röntgen, on conviendra qu'ils leur ressemblent singulièrement.

---

(1) *Voir* note p. 106.

24. Vitesse des rayons cathodiques. — La vitesse des rayons émanés de la cathode est un important critérium de leur nature ; elle permet, en effet, de décider s'ils peuvent être considérés comme dus au mouvement de la matière, ou s'il faut abandonner cette hypothèse ([1]).

Nous avons dit déjà que M. Goldstein avait appliqué la méthode Doppler-Fizeau à leur investigation et n'avait pas pu déceler un mouvement quelconque du gaz luminescent dans le tube. M. Tait avait fait, à la même époque, une constatation analogue. Plus tard, MM. Wiedemann et Ebert trouvèrent que la vitesse des particules lumineuses autour de la cathode ne pouvait pas dépasser 5 kilomètres par seconde ([2]).

Toutefois, ces expériences ne nous disent rien sur la véritable vitesse des rayons cathodiques. Nous avons vu (**21**) que l'effet lumineux est toujours produit par le choc de ces rayons sur des particules matérielles, ou, plus probablement (**9**), par la recombinaison des éléments dissociés par le choc ; on peut donc seulement en conclure que, au moment où elles émettent de la lumière, ces particules ne sont pas douées d'une vitesse considérable.

Les expériences récentes de M. J.-J. Thomson ne sont pas soumises à cette objection ([3]). Deux récepteurs luminescents sont disposés respectivement à 15^{cm} et 25^{cm} de la cathode d'un tube cylindrique. Celui-ci est recouvert de noir de fumée que l'on a enlevé suivant deux lignes paral-

---

([1]) Si l'on trouvait, par exemple, une vitesse du rayon égale à celle de la lumière, la nature optique du phénomène deviendrait évidente. Un gramme de matière doué de cette vitesse posséderait une énergie cinétique égale à celle que fournirait un cheval-vapeur travaillant pendant près de 2000 ans, ce que l'on peut difficilement admettre.

([2]) E. Wiedemann et H. Ebert, *Ueber electrische Entladungen* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXVI, p. 643 ; 1889).

([3]) J.-J. Thomson, *On the Velocity of the cathode-rays* (*Philosophical Magazine*, t. XXXVIII, p. 358 ; 1894).

lèles à l'axe du tube, situées au-dessus des récepteurs. Un ensemble de six miroirs tournants fixés sur le même tambour renvoie l'image des fentes dans un objectif de grand diamètre. On a disposé, sur le trajet d'un des faisceaux, un prisme de très faible ouverture qui amène l'image des deux fentes dans le prolongement exact l'une de l'autre. Avec les moyens ordinaires d'excitation du tube, l'image des fentes s'étale beaucoup lorsque le miroir tourne rapidement, de sorte que l'observation perd toute précision.

Le dispositif employé finalement par M. Thomson consiste en une forte bobine fermée sur les armatures extérieures de deux condensateurs dont les armatures intérieures sont réunies par le primaire d'une seconde bobine noyée dans l'huile. Le secondaire de cette bobine donne des étincelles de 20^{cm} environ. Le tube est en verre d'urane.

Dans ces conditions, le premier bord de l'image est parfaitement net, tandis que le second est estompé en raison de la durée de la luminescence. Il convient donc de rapporter les résultats au début de l'effet lumineux. On pourrait objecter à ces mesures que, si l'on observe un intervalle appréciable entre l'apparition des deux images, il peut être dû au fait que la deuxième, produite par une excitation moins intense, atteint plus lentement un éclat perceptible. M. Thomson avait prévu cette objection et s'en était garanti par un examen du phénomène sur lequel nous n'insisterons pas.

La vitesse des rayons cathodiques trouvée par M. J.-J. Thomson est de 200 kilomètres par seconde. Cette vitesse est parfaitement justifiée par le potentiel réciproque de la cathode et d'un atome gazeux qui s'en échappe. Elle est beaucoup plus faible que la vitesse de la décharge elle-même, qui est environ moitié moindre que celle de la lumière, d'après les mesures faites aussi par le professeur Thomson.

On revient ainsi, par une voie nouvelle, à ce principe qui ressort des expériences de Hertz, que les rayons cathodiques, s'ils contribuent à la décharge dans les gaz, n'en forment qu'une partie. La vitesse de 200 kilomètres par seconde est inconnue jusqu'ici pour les perturbations de l'éther; il est donc vraisemblable que, si les rayons cathodiques sont dus à un phénomène de cet ordre, comme le veut la théorie des physiciens allemands, on se trouve en présence d'un principe nouveau.

On peut rattacher à la vitesse des rayons cathodiques la question des modifications que ces rayons font subir à l'éther dans lequel ils se déplacent.

MM. Wiedemann et Ebert ont mesuré l'indice de réfraction d'un espace dans lequel on produisait, par intermittences, des rayons cathodiques; ils ont trouvé que la présence de ces rayons ne modifie pas l'indice et, par conséquent, la vitesse de la lumière d'une quantité supérieure à $\frac{1}{67000}$, limite de la précision de leurs mesures.

25. Convection de l'électricité par les rayons cathodiques. — Le transport des charges électriques par les rayons cathodiques a été rendu évident par l'expérience suivante due à M. Perrin [1].

Une cage de Faraday, placée à l'intérieur d'un tube à vide, contient une feuille cylindrique de papier d'étain réunie à un électroscope. La cage elle-même, qui sert d'anode, est à la terre et son ouverture, très petite, est en regard de la cathode. Lorsque les rayons tombent sur l'entrée de la cage, l'électroscope se charge négativement. L'action électrique cesse lorsqu'on dévie les rayons à l'aide

---

[1] J. Perrin, *Nouvelles propriétés des rayons cathodiques* (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXXI, p. 1130; 1895).

d'un aimant. Le phénomène inverse se produit si l'on renverse les pôles de la bobine.

La conclusion que M. Perrin tire de cette expérience est que les ions, formés au voisinage de la cathode par la rupture des molécules gazeuses, jouent le rôle de support de charges électriques qu'ils perdent dans une enceinte dans laquelle ils entrent.

26. Pénétration des gaz dans le verre. — Les tubes à vide présentent, après un emploi un peu prolongé, un aspect mat qui peut faire croire à une dévitrification. M. Gouy [1] a reconnu que la couche superficielle du verre située à l'intérieur du tube contient une foule de petites bulles gazeuses invisibles à l'œil nu, mais bien reconnaissables au microscope. Si l'on chauffe le verre, les bulles deviennent plus apparentes; on peut même les rendre visibles à l'œil nu lorsqu'elles se sont suffisamment agglomérées. Elles se trouvent réparties à une très petite profondeur dans le verre. « Ce phénomène ne se produit dans aucun autre cas. Il semble en résulter, dit M. Gouy, que les rayons cathodiques font pénétrer dans le verre les gaz du tube, qui restent ensuite occlus jusqu'à ce que le ramollissement du verre les mette en liberté. »

---

[1] G. Gouy, *Sur la pénétration des gaz dans les parois de verre des tubes de Crookes* (*Comptes rendus*, t. CXXII, p. 775; 1896).



CHAPITRE VI.

LES RAYONS X.

27. Analyse du Mémoire de M. Röntgen. — C'est dans une séance désormais mémorable de la Société physico-médicale de Würtzbourg que le professeur Röntgen annonça pour la première fois sa brillante découverte.

Le point de départ de ses recherches est l'observation fortuite de la phosphorescence de quelques paillettes de platinocyanure de baryum au voisinage d'un tube de Hittorf, complètement enfermé dans une enveloppe de carton noir, opaque aux rayons lumineux ordinaires et aux radiations ultra-violettes connues. Les premières expériences ayant montré que l'écran s'illuminait encore, quoique faiblement, derrière un livre de 1000 pages, une planche de bois ou une plaque d'aluminium de 15^{mm} d'épaisseur, il devint évident que l'on se trouvait en présence d'un agent sinon entièrement nouveau, du moins mal connu jusqu'alors. M. Röntgen s'attacha à en reconnaître les principales propriétés. Il trouva d'abord que la densité est un facteur important de l'opacité des corps; toutefois il n'est pas le seul : « On le prouve en employant comme écrans des lames d'égale épaisseur de spath d'Islande, de verre, d'aluminium et de quartz. Le spath d'Islande se montre beaucoup plus transparent que les

autres corps, bien qu'il ait approximativement la même densité. Je n'ai pas remarqué, dit le professeur Röntgen, que le spath d'Islande présentât une fluorescence (9) considérable relativement à celle du verre.

» En augmentant l'épaisseur, on augmente la résistance offerte aux rayons par tous les corps.... »

« Des morceaux de platine, de plomb, de zinc et d'aluminium en feuilles ont été préparés de façon à obtenir le même affaiblissement de l'effet. Le Tableau ci-joint donne les épaisseurs relatives et les densités de feuilles de métal équivalentes :

	Épaisseur. mm	Épaisseur relative.	Densité.
Platine................	0,018	1	21,5
Plomb.................	0,050	3	11,3
Zinc...................	0,100	6	7,1
Aluminium...........	3,500	200	2,6

» Il résulte de ces valeurs que l'opacité n'est pas proportionnelle au produit de la densité par l'épaisseur d'un corps. La transparence augmente beaucoup plus rapidement que le produit ne décroît [1]. »

M. Röntgen a cherché, sans y réussir, à déceler une action calorifique des rayons X; cette action existe évidemment, puisque nous avons affaire à une forme de l'énergie susceptible de se transformer; mais l'énergie des rayons peut être très faible.

L'œil ne perçoit pas ces rayons. M. Röntgen pense que la cause en est dans l'insensibilité de la rétine; nous verrons, toutefois, que les milieux de l'œil sont opaques pour

---

[1] Les expériences faites sur l'aluminium et même sur le zinc nous paraissent peu propres à renseigner sur le rôle de la densité, à cause des phénomènes de luminescence que présentent les oxydes de ces deux métaux. (*Voir* Chap. IX.)

les rayons X, et que, si même la rétine y était sensible, ils resteraient invisibles.

La propriété la plus remarquable des rayons découverte par M. Röntgen est leur propagation tellement rectiligne, qu'il n'est pas parvenu à trouver aucune déviation dans le passage à travers un prisme. Quelques mesures semblent donner un indice plus grand que l'unité, mais l'observation est douteuse. Il est un moyen, sinon précis, du moins très sensible, de mettre en évidence la réfraction à la surface des corps : c'est de diriger le rayon sur une poudre dont chaque grain contribue à la réfraction irrégulière du faisceau et à sa diffusion. Cette diffusion était insensible dans les expériences de M. Röntgen. Le faisceau éprouvait, en traversant une colonne de sel gemme, de zinc ou d'argent pulvérisés, la même absorption qu'au passage d'une masse égale des mêmes solides en morceaux compacts. La même expérience montre que la réflexion à la surface des corps est extrêmement faible.

Il a semblé possible que la disposition géométrique des molécules modifiât l'action qu'exerce un corps sur les rayons X; s'il en était ainsi, le spath d'Islande, par exemple, pourrait présenter des phénomènes différents, suivant l'orientation de la radiation par rapport à l'axe du cristal. Des expériences faites sur le quartz et le spath d'Islande n'ont donné aucun résultat.

M. Röntgen pense que le point d'émission des rayons X est l'endroit du tube où les rayons cathodiques frappent le verre. A partir de ce point, l'intensité de leur effet diminue, en raison du carré de la distance, l'absorption par l'air étant si faible qu'elle peut être négligée, au moins en première approximation. De plus, on déplace la source des rayons X en agissant, à l'aide d'un aimant sur les rayons cathodiques, de manière à les amener en un autre endroit

du tube. On provoque aussi la formation des nouvelles radiations en arrêtant les rayons cathodiques à l'aide d'une plaque d'aluminium.

M. Röntgen ne pense pas que les nouveaux rayons soient identiques à ceux qui émanent de la cathode ; ils en diffèrent par plusieurs propriétés importantes, en particulier par leur insensibilité à l'action de l'aimant.

« La déviation des rayons cathodiques par l'aimant est une de leurs caractéristiques spéciales ; Hertz et Lenard ont observé qu'il existe plusieurs espèces de rayons cathodiques, qui diffèrent par leur propriété d'exciter la phosphorescence, leur facilité d'absorption et leur degré de déviation par l'aimant ; mais on a observé une déviation notable dans tous les cas étudiés, et je pense que cette déviation constitue un caractère qu'on ne peut pas négliger facilement. »

M. Röntgen reconnut ensuite qu'un certain nombre de substances s'illuminent sous l'action des rayons X ; puis il étudia leur action photographique. Il put ainsi éliminer mieux les causes d'erreurs.

« J'ai confirmé de la sorte, dit-il, beaucoup d'observations faites d'abord en regardant l'écran fluorescent. C'est ici que la propriété que présentent les rayons X de passer à travers le bois ou le carton devient utile. La plaque photographique peut être exposée à leur action sans qu'on ait à enlever le volet du châssis, ni aucune boîte protectrice, de sorte que l'opération n'a pas besoin d'être conduite dans l'obscurité. Il est clair que les plaques qui ne sont pas en expérience ne doivent pas être laissées dans leur boîte au voisinage du tube.

» Il resterait à savoir si l'impression sur la plaque est

un effet direct des rayons X, ou un résultat secondaire dû à la fluorescence de la matière de la plaque. Des pellicules peuvent être impressionnées aussi bien que les plaques sèches ordinaires. »

Les applications que M. Röntgen a faites le premier de sa découverte sont connues de tous ; il a montré comment on pouvait, par leur moyen, dessiner le profil des parties les plus denses à l'intérieur d'un organisme vivant, projeter l'ombre d'un objet enfermé dans une boîte en bois, déceler les inégalités de structure d'une lame de métal préalablement soumise au laminage.

Nous reviendrons, dans un autre Chapitre, sur les applications de la méthode. Il nous paraît plus intéressant de donner ici l'opinion de M. Röntgen sur la nature même de sa découverte. Après avoir cherché, sans succès, à reproduire, à l'aide de ses rayons, les phénomènes classiques de l'Optique, tels que l'interférence et la polarisation, il abandonna l'idée que les rayons X puissent être de la lumière, et il eut recours à une autre hypothèse. Nous rendons la parole à M. Röntgen :

« Que sont donc ces rayons? Puisque ce ne sont pas des rayons cathodiques, on pourrait supposer, d'après leur faculté de produire la fluorescence et l'action chimique, qu'ils sont dus à la lumière ultra-violette. Un ensemble imposant de preuves est en contradiction avec cette hypothèse. Cette lumière nouvelle possède, en effet, les propriétés suivantes :

» (*a*) Elle ne se réfracte pas en passant de l'air dans l'eau, dans le sulfure de carbone, l'aluminium, le sel gemme, le verre ou le zinc.

» (*b*) Elle ne peut se réfléchir régulièrement à la surface des mêmes corps.

» (*c*) Elle n'est polarisée par aucun des milieux polarisants ordinaires.

» (*d*) Elle est absorbée par les différents corps, surtout en raison de leur densité.

» Ce qui revient à dire que les nouveaux rayons doivent se comporter tout autrement que les rayons visibles ou infra-rouges et les rayons ultra-violets déjà connus. Cela paraît assez invraisemblable pour que j'aie cherché à faire une autre hypothèse.

» Il semble y avoir une sorte de relation entre les nouveaux rayons et les rayons lumineux; tout au moins la production d'ombres, de fluorescence et d'actions chimiques semble l'indiquer. Or, on sait depuis longtemps qu'en outre des vibrations qui rendent compte des phénomènes lumineux, il est possible que des vibrations longitudinales se produisent dans l'éther; certains physiciens pensent même que ces vibrations doivent exister. Toutefois, il faut convenir que leur existence n'a jamais été mise en évidence et que leurs propriétés n'ont pas été établies par l'expérience. Ces nouveaux rayons ne devraient-ils pas être attribués à des ondes longitudinales de l'éther?

» Je dois avouer qu'à mesure que je poursuivais ces recherches, je me suis accoutumé de plus en plus à cette idée et je me permets de l'énoncer, sans me dissimuler que l'hypothèse demande à être établie plus solidement. »

28. Rayons cathodiques et rayons X. — Avant de pousser plus avant l'étude des nouvelles radiations, il nous reste un point à faire ressortir d'une façon nette : c'est la différence essentielle entre les rayons cathodiques et les rayons découverts par M. Röntgen. A première vue, la synthèse des expériences de M. Lenard et de M. Röntgen pourrait

laisser subsister quelque doute à cet égard. Nous avons vu, en effet, que les rayons cathodiques possèdent, à des degrés divers, la faculté d'être absorbés par les milieux matériels ou déviés dans le champ magnétique. On peut dès lors se demander s'il n'existe pas des rayons cathodiques ne possédant ces deux propriétés à aucun degré.

S'il en était ainsi, les rayons de Röntgen devraient partir de la cathode, traverser en ligne droite les parois du tube, et continuer à se propager dans la même direction. Or il n'en est rien; leur point d'émission se déplace sous l'influence de l'aimant, et, si l'on opère avec un tube sphérique, entièrement illuminé, chacun de ses points est un centre d'émission envoyant sa radiation en tous sens.

La loi de diminution avec le carré de la distance, énoncée par M. Röntgen en termes assez vagues (la distance étant indiquée, dans son Mémoire provisoire, *à partir du tube*), a été vérifiée avec plus de précision par d'autres observateurs aidés par des moyens nouveaux. La loi du carré a été retrouvée à partir d'un point précis de la paroi du tube, ou, plus généralement, de la première surface qui arrête les rayons cathodiques.

Si maintenant nous retournons aux travaux de M. Goldstein, de M. Lenard et de M. Wiedemann, nous y verrons partout la trace des nouveaux rayons. On se souvient que M. Goldstein (**19**) avait interprété comme une réflexion diffuse la production du phénomène par l'interposition d'une lame de mica sur le trajet des rayons cathodiques. De son côté, M. Lenard avait séparé nettement par l'expérience le phénomène en deux radiations distinctes (**22**), l'une diffusée dans la matière et déviée par l'aimant, l'autre soustraite à ces deux actions.

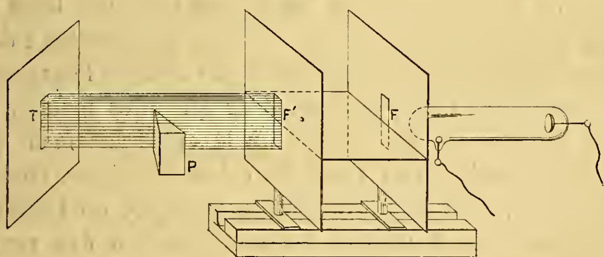
Si nous ajoutons à cela que M. Lenard, soucieux avant tout de la conservation de ses tubes pour des expériences

comparatives, ne les actionnait que pendant des durées limitées à quelques secondes, et qu'il opérait avec une fenêtre de très faibles dimensions, on admettra sans peine que quelques-unes des propriétés des nouveaux rayons dussent lui échapper. M. Wiedemann est allé plus loin; il a vu, dans les « rayons de décharge », une nouvelle forme de l'énergie; il n'a négligé que l'essai des corps opaques.

Ce point de vue simplifie singulièrement l'interprétation des phénomènes; les impossibilités que l'on opposait à la théorie matérialiste des rayons cathodiques s'évanouissent d'elles-mêmes si l'on se limite aux phénomènes dans le tube ou au voisinage immédiat de la fenêtre. Nous reviendrons sur cette affirmation, qu'il n'était pas inutile d'énoncer dès maintenant.

29. La propagation des rayons X. Réfraction et réflexion. — La propriété physique la plus remarquable des rayons de Röntgen est leur propagation rectiligne. M. Röntgen avait énoncé le fait comme approximativement exact. Il convenait de le vérifier avec précision. C'est ce qu'a fait M. J. Perrin, au laboratoire de l'École Normale, à Paris (¹).

Fig. 13.



(¹) La plupart des travaux dont nous parlerons dans la suite ont été insérés aux *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* ou analysés dans *Nature*

L'appareil (*fig.* 13) consistait essentiellement en deux écrans percés de fentes étroites F, F', placées parallèlement, et délimitant un pinceau plan et très net de rayons. Le faisceau tombait sur une plaque sensible enfermée dans un châssis. Au développement, on trouva l'image absolument nette de la fente, sans aucune frange de diffraction. En opérant, au contraire, à châssis ouvert, de façon à permettre à la lumière verte du tube de frapper directement la plaque, on releva des lignes d'interférence bien caractérisées.

Ce résultat peut être dû à deux causes distinctes. Il est possible que le phénomène, s'il est périodique de sa nature, soit trop irrégulier pour que des raies d'interférence soient susceptibles de se produire, ou bien que la longueur de l'ondulation qui l'engendre soit extrêmement courte.

M. Perrin étudia ensuite, à l'aide du même dispositif, la réfraction à travers des substances diverses; un prisme de la substance à étudier était placé entre la deuxième fente et la plaque. Un écran horizontal séparait les fentes en deux, de manière à éviter les rayons obliques. Dans ces conditions, on trouva l'image des deux demi-fentes T dans le prolongement exact l'une de l'autre lorsque le prisme P était en cire ou en paraffine. Pour quelques métaux, les deux demi-fentes montraient un léger déplacement qui, s'il n'est pas dû à une absorption dissymétrique, conduit à admettre, pour l'aluminium par exemple, un indice de réfraction égal à 0,9996. La concentration des rayons devrait donc être faite à l'aide de lentilles concaves. Mais l'indice est trop faible pour qu'il puisse y avoir aucun intérêt pratique à cet artifice, l'absorption compensant outre mesure la concentration.

La possibilité de réfléchir les rayons X est fort discutée. M. Röntgen lui-même cite deux expériences qui semblent

conduire à des résultats contradictoires. M. Perrin n'a obtenu aucune trace de réflexion sur des miroirs d'acier ou de flint.

Au contraire, MM. Battelli et Garbasso (1), à Pise, MM. Imbert et Bertin-Sans, à Montpellier, pensent pouvoir conclure de leurs expériences que ces rayons éprouvent une sorte de réflexion diffuse lorsqu'ils frappent certains corps; mais aucun de ces observateurs n'est parvenu à mettre en évidence une réflexion régulière sur les miroirs polis. Les premiers plaçaient l'ampoule dans un tube de zinc courbé à angle droit, le coude étant occupé par le miroir. La radiation était reçue par une plaque photographique que l'on trouva impressionnée dans toute la région en regard de l'intérieur du tube.

Les résultats de MM. Imbert et Bertin-Sans varient suivant les corps employés et ne semblent pas être en relation directe avec l'opacité aux rayons X. La réflexion la plus vigoureuse a été obtenue avec une armature d'un condensateur d'Œpinus.

Il nous semble que la phosphorescence a pu jouer, dans toutes ces expériences, un rôle dont il n'est pas encore possible d'apprécier l'importance, mais qui est loin d'être nul. Il faudrait, dans toutes les recherches de cette nature, éviter avec le plus grand soin les oxydes métalliques sur le parcours des rayons.

M. Gouy, M. Fonséré et d'autres physiciens ont observé une réflexion sur du mercure; ces expériences ne semblent pas soumises à l'objection que nous avons faite aux précédentes; mais il faudrait encore s'assurer que la surface de mercure agit bien comme un miroir et non comme un

---

(1) A. Battelli et A. Garbasso, *Sopra i raggi del Röntgen* (*Nuovo Cimento*, 4e série, t. III, janvier 1896).

foyer secondaire de production des rayons. Plusieurs des premiers observateurs ont opéré avec des poses de quelques heures; il est probable que, dans ces conditions, le tube était très affaibli. Toutes les expériences faites jusqu'ici devront être reprises lorsque les meilleures conditions de l'emploi des tubes auront été définitivement fixées.

30. Interférence et polarisation. — Nous venons de voir que M. Perrin avait reconnu la marche extrêmement rectiligne des rayons X, mais sans fixer de limite aux phénomènes de diffraction. M. Sagnac, au contraire, a cherché à reproduire avec un réseau les phénomènes d'interférence que l'on vérifiait immédiatement à l'aide d'un faisceau de lumière jaune. Les rayons X n'ont présenté ces phénomènes à aucun degré, la certitude de l'interprétation des clichés étant telle que des interférences produites par des ondes quatorze fois plus courtes que celles de la raie D seraient devenues apparentes. On en conclut que, si les rayons X sont dus à des vibrations transversales de l'éther, leur longueur d'onde est inférieure à $0^{\mu},04$.

Les expériences de polarisation ont la plus grande importance pour fixer la théorie du phénomène. Les premiers résultats positifs dans cette direction ont été obtenus par le prince Galitzine et M. de Karnojitzky. Voici comment ils décrivent l'expérience :

« Nous avons fait préparer trois petites plaques de tourmaline très minces ($0^{mm},5$ environ d'épaisseur). Sur la plus grande se posaient les deux autres, une parallèlement, l'autre perpendiculairement à la première. S'il y a polarisation là où les plaques sont croisées, on doit s'attendre à voir l'action des rayons X affaiblie. Il va sans dire que l'action de la lumière ordinaire a été exclue, et qu'on a changé plusieurs fois la position relative des petites

plaques, afin d'éliminer toute influence d'inégale épaisseur ou de manque d'homogénéité. Dans les huit épreuves obtenues, on peut distinguer que là où les plaques ont été croisées, l'action photochimique des rayons X a été moindre. »

Les épreuves ont dû être renforcées par la superposition de plusieurs pellicules semblables, ce qui indique en tous cas une polarisation extrêmement faible.

Ce résultat a été contesté; M. A.-M. Mayer, opérant avec des cristaux d'hérapathite (sulfate d'iodoquinine), M. H. Becquerel, se servant de tourmalines, enfin M. Sagnac, qui a eu recours à divers corps cristallisés, n'ont observé aucun effet appréciable. M. Becquerel a comparé les résultats obtenus avec les rayons X à ceux que donnent les radiations émanées des corps phosphorescents; ces dernières se laissent polariser d'une façon évidente.

L'ensemble de ces expériences ne nous fournit aucun argument définitif pour la théorie des rayons X. D'une part, on pourrait admettre que les appareils de MM. Mayer, Becquerel, Sagnac, manquaient de sensibilité; d'autre part, on serait autorisé à croire que MM. Galitzine et de Karnojitzky ont été induits en erreur par un phénomène secondaire. Il serait imprudent de se prononcer entre ces deux opinions.

31. Actions lumineuses et photographiques. — Les rayons X illuminent un grand nombre de substances; le platinocyanure de baryum, qui les a fait découvrir, et les platinocyanures en général sont parmi les plus sensibles à leur action.

Si l'on examine au spectroscope la lumière émanant d'un de ces écrans, on y reconnaît les raies du métal formant la base du sel en question, ce qui est l'indice d'une décom-

position de ce sel. Cette observation a été faite pour la première fois, croyons-nous, depuis la découverte des rayons X, par M. Jackson, sur un écran de platinocyanure de potassium qui est, d'après M. Silvanus-P. Thomson, douze fois environ plus sensible aux rayons X que le sel correspondant de baryum. M. Wiedemann avait déjà eu recours aux sels de chaux, à l'aide desquels on peut préparer, à peu de frais, des écrans aussi sensibles et même plus sensibles qu'en se servant de platinocyanures.

Dans ses études antérieures sur les « rayons de décharge », M. E. Wiedemann avait trouvé, après avoir étudié un très grand nombre de substances diverses, que « les sels de chaux additionnés des sels correspondants de manganèse donnent, sous l'action des rayons, soit directement, soit seulement pendant une chauffe subséquente, une lumière très vive et de très belles colorations. » Il avait déjà constaté, du reste, le fait découvert par M. Jackson.

M. Édison a annoncé que le tungstate de calcium dépassait en sensibilité tous les autres sels connus. Les essais faits en Europe sur du tungstate pur ont donné des résultats assez médiocres. Il nous semble probable que le tungstate employé par M. Édison contenait du tungstate de manganèse, qui s'y trouve presque toujours comme impureté; les sels de chaux qui n'ont pas subi une purification préalable contiennent généralement une petite quantité de manganèse.

L'état du sel a la plus grande influence sur sa luminosité; certains sels ont une grande sensibilité à l'état cristallin, et la perdent lorsqu'on les pulvérise ; d'autres doivent être employés à l'état amorphe ou tout au moins d'extrême division.

Il semble probable, du reste, que certains sels conviennent surtout à certains tubes, et que la sensibilité d'un

écran ne peut être définie qu'en connexion avec un tube déterminé ; nous avons vu déjà que, parmi les mélanges étudiés par M. Wiedemann, les uns deviennent lumineux sous une lame de spath fluor, tandis que d'autres restent absolument inertes dans ces conditions.

On ne sait pas encore si l'action photographique des rayons X est primaire ou secondaire. M. Röntgen avait déjà cherché à résoudre la question, et avait opéré, comme nous l'avons vu, avec des pellicules, pour éviter la transformation des rayons dans le verre. Mais la gélatine peut être elle-même luminescente, et l'on ne serait mieux fixé qu'en opérant avec des halogènes sans support. Dans toute la Photographie, le support joue, du reste, un rôle beaucoup plus considérable qu'on ne le croit communément.

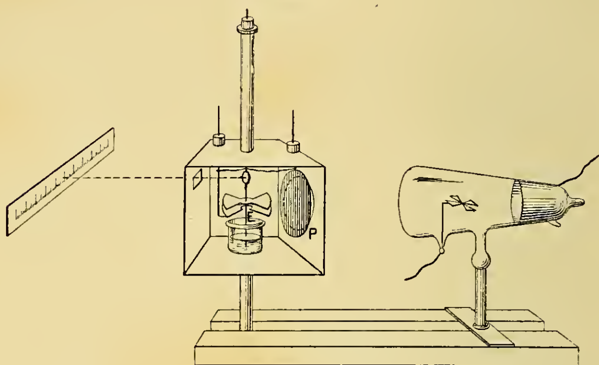
Une expérience qui semble confirmer cette opinion, en ce qui concerne les rayons X, est due à MM. Eder et Valenta. Les habiles photographes de Vienne ont trouvé que les plaques au collodion sont insensibles à ces rayons.

Nous venons de voir que les rayons X agissent sur les écrans luminescents en décomposant le sel dont ils sont formés. Il semble donc naturel qu'une action semblable puisse se produire dans la plaque photographique, le sel d'argent étant pour ainsi dire ionisé par les rayons.

M. Albert Londe a constaté que les diverses émulsions se rangent, en ce qui concerne leur sensibilité aux rayons X, dans le même ordre que pour leur sensibilité à la lumière blanche, et ce résultat a été confirmé par MM. A. et L. Lumière. Ces derniers ont trouvé aussi qu'au bout de dix minutes de pose, les rayons X avaient impressionné 150 feuilles de papier au gélatinobromure. En prolongeant la pose, ils ont impressionné de même 250 feuilles : les papiers sensibles sont à peu près deux fois plus opaques que les mêmes feuilles non recouvertes d'émulsion.

32. Propriétés électriques des rayons X. — MM. Benoist et Hurmuzescu, à Paris, M. Dufour, à Lausanne, M. J.-J. Thomson, à Cambridge, ont successivement annoncé que les rayons X, tombant sur un électroscope, le déchargent rapidement. Les premières expériences ont

Fig. 14.



été faites avec un électroscope à feuilles d'or; cet instrument a été remplacé, pour les recherches quantitatives de MM. Benoist et Hurmuzescu, par l'électromètre à deux aiguilles que représente notre *fig.* 14.

Les aiguilles sont enfermées dans une caisse en laiton, que des expériences préliminaires avaient révélé remarquablement opaque pour les radiations de Röntgen. Du côté du tube, la caisse est percée d'une fenêtre circulaire, fermée par une feuille d'aluminium; la face opposée au tube porte une autre fenêtre munie d'une vitre.

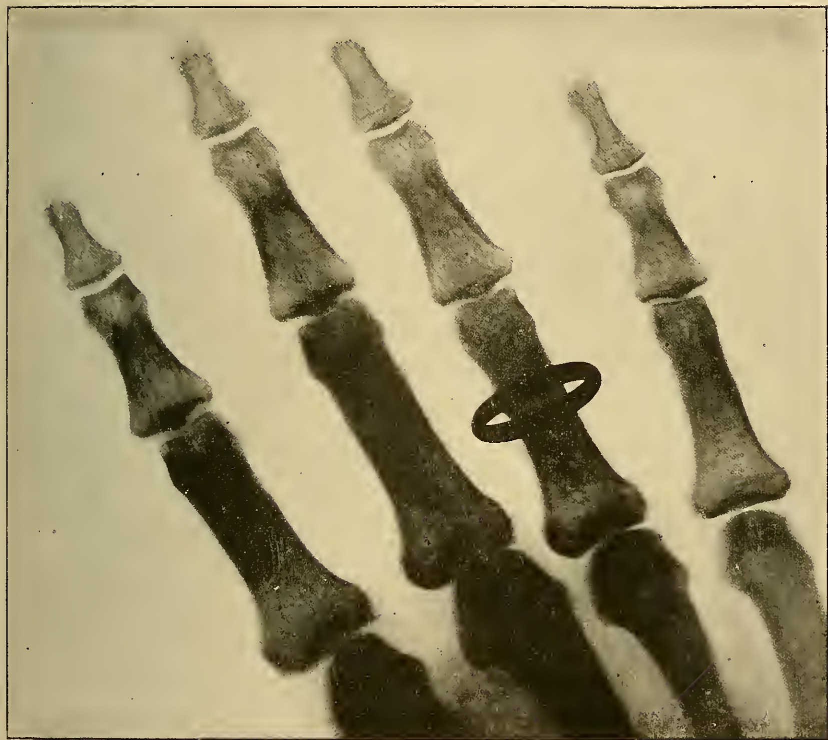
L'électromètre est donc dans une cage de Faraday, empêchant tout accès à l'air électrisé, et fermée électriquement, à l'exception d'une petite surface opposée au tube.

Trois séries distinctes d'expériences peuvent être faites



RADIOGRAPHIE D'UNE MAIN CONTENANT UNE BALLE DE REVOLVER.

Épreuve de M. Albert Londe.



RADIOGRAPHIE DES OS DE LA MAIN
OBTENUE AVEC UN TUBE A FOYER DE PLATINE.

Épreuve de M. J. Chappuis.

à l'aide de cet instrument. Il conviendra d'abord de rechercher si la rapidité de la décharge dépend de la nature du métal qui reçoit la radiation. Pour cela, on placera, derrière la fenêtre, des plaques épaisses de divers métaux P, réunies à l'aiguille fixe de l'électromètre E, l'autre aiguille étant à la terre en même temps que la cage. On étudiera ensuite la transparence des corps en les plaçant, en lames plus ou moins épaisses, devant la fenêtre. Enfin, on cherchera à reconnaître l'influence du milieu ambiant.

Ce procédé présente, sur la méthode photographique, l'avantage d'être beaucoup plus rapide et d'offrir moins d'arbitraire dans l'interprétation des résultats. Bien que son mécanisme soit encore insuffisamment connu, c'est, pour le moment, la meilleure méthode d'étude quantitative des rayons de Röntgen.

La rapidité de la décharge dépend du récepteur; MM. Benoist et Hurmuzescu ont trouvé que l'électricité se perd d'autant plus vite que le corps est plus opaque aux rayons; ainsi, le platine se décharge environ deux fois plus vite que l'aluminium dans un même milieu gazeux; le zinc amalgamé perd encore plus vite sa charge, mais il faut observer que, lè récepteur étant semi-liquide, les phénomènes d'évaporation ou de désagrégation ont pu être plus abondants. Pour des plaques très minces, l'action augmente avec l'épaisseur jusqu'à une certaine limite.

MM. Benoist et Hurmuzescu ont trouvé que, si l'on a soin d'enfermer tout l'appareil, et de soustraire les isolants à des actions extérieures, la décharge de l'électromètre est complète, quel que soit le signe de la charge initiale.

M. Righi, au contraire, pense qu'il reste toujours dans l'électromètre une charge positive. Il nous semble que ses expériences ont pu être faussées par l'action du diélectrique.

Comme MM. Benoist et Hurmuzescu, M. J.-J. Thomson trouve une décharge complète de l'électroscope, quel que soit le signe de la charge. En laissant le tube en communication avec la pompe, il a reconnu que la décharge commence au moment précis où, le vide étant poussé assez loin, on voit apparaître les véritables rayons cathodiques.

Cette action des rayons de Röntgen ne se produit pas seulement dans l'air; un corps entièrement noyé dans la paraffine, et conservant indéfiniment sa charge dans les circonstances ordinaires, la perd rapidement lorsqu'on envoie un faisceau de rayons Röntgen sur l'isolant.

Deux paires d'électrodes furent noyées dans de la paraffine, formant les quatre angles d'un carré; le bloc étant fixe, ainsi que tout l'appareil, on chargea successivement les deux paires d'électrodes à des potentiels différents; le tout était orienté de telle façon que les rayons traversaient la paraffine parallèlement à la ligne joignant l'une des paires d'électrodes. Dans ces conditions, il n'a pas été possible de déterminer une influence de l'orientation du rayon sur le phénomène.

D'une manière générale, tous les diélectriques semblent devenir conducteurs pendant le passage des rayons Röntgen. M. J.-J. Thomson s'explique nettement sur la cause probable de cette action. Des expériences particulières lui ayant montré que la perte, dans un gaz, est proportionnelle à la racine carrée de sa densité, il en conclut que la décharge est due à l'ionisation du gaz, dissocié par les rayons. Les lois de la dissociation ont, en effet, une allure semblable à celle qui a été trouvée pour la déperdition des charges [1]; lorsque la dissociation est faible, le nombre

---

[1] M. Righi est arrivé à un résultat analogue en ce qui concerne la marche générale du phénomène.

des ions est proportionnel à la racine carrée de la densité.

Suivant M. Thomson, la déperdition est plus rapide dans l'acide carbonique que dans l'air, et moins rapide dans l'hydrogène; elle est très rapide dans les halogènes et la vapeur de mercure.

M. Thomson a trouvé, en outre, qu'une masse d'air traversée par les rayons X conserve pendant un instant la faculté de décharger les corps électrisés. On le montre en mettant l'électromètre à l'abri des rayons, tandis que l'on dirige sur son récepteur l'air qu'ils traversent.

La symétrie des propriétés des gaz, par rapport aux deux électricités, montre bien qu'il s'agit ici d'une modification de la molécule, et non d'une charge électrique. Il serait particulièrement intéressant, à ce point de vue, de répéter l'expérience avec des gaz monoatomiques.

MM. Benoist et Hurmuzescu ont retrouvé, par des expériences encore inédites, la loi de la racine carrée de la densité pour un même gaz; mais ils en ont singulièrement étendu la portée en démontrant qu'elle reste vraie pour différents gaz; elle peut donc être énoncée dans les termes suivants :

Quel que soit le milieu gazeux entourant un même récepteur des rayons X d'une qualité et d'une intensité données, la vitesse de déperdition des charges électriques est proportionnelle à la racine carrée de la densité du gaz.

Dans l'idée de MM. Benoist et Hurmuzescu, la déperdition des charges se fait par convection, sans ionisation; les phénomènes étudiés par M. Piltchikoff et par M. Lafay se ramèneraient ainsi plus facilement peut-être à l'ensemble de ceux que l'on connaît. Du reste, ces phénomènes ne sont pas isolés; on leur rattacherait aisément ceux que présentent les corps soustraits à l'action des rayons X, et

qui prennent un potentiel limite dans chaque gaz. Mais ces phénomènes sont encore insuffisamment connus, et l'on ne pourra en faire la synthèse qu'après de nombreuses expériences.

Les diélectriques sont aussi déchargés par les rayons. M. Righi l'a montré par l'expérience suivante : Une plaque d'ébonite ou d'un autre corps isolant est d'abord électrisée uniformément, puis soumise à l'action des rayons avec interposition partielle de corps opaques. La plaque est ensuite saupoudrée du mélange classique de soufre et de minium ; suivant le signe de l'électrisation primitive, l'une ou l'autre de ces substances s'attache aux portions protégées par l'écran et dessine son contour. En revanche, suivant M. Piltchikoff, les couches doubles d'électricité sont très peu affectées par les rayons.

Nous avons rappelé (**7**) que la lumière ultra-violette traversant un gaz lui communique la propriété de décharger les corps électrisés, en même temps qu'elle produit sa dissociation partielle. Il existe toutefois, entre les deux phénomènes, une différence dont il n'est pas encore possible d'estimer l'importance : les rayons de Röntgen agissent indifféremment sur les deux électricités ; la lumière ultra-violette, au contraire, ne semble avoir d'action que sur les charges négatives.

33. Électrisation de la trajectoire des rayons. — On peut rattacher aux propriétés que nous venons de signaler de curieuses expériences de M. Lafay concernant le passage des rayons X à travers une plaque de métal électrisée.

Une feuille mince d'argent, fermant la fente d'une plaque de plomb, porte en son axe un fil de platine. Le faisceau des rayons X, tombant sur la lame, est limité par une première fente. On s'assure d'abord que le passage

des rayons entre les pôles d'un électro-aimant, au sortir de la seconde plaque, ne déplace pas l'image du fil de platine, puis on électrise la lame d'argent; on obtient alors une déviation de l'image qui change de sens avec celui du champ et le signe de l'électrisation.

Les rayons sont également déviés si l'on place le champ magnétique en amont de la lame électrisée.

M. Lafay pense que les rayons électrisés reprennent les propriétés des rayons cathodiques qu'ils avaient en partie perdues à la traversée des parois du tube. La dernière expérience conduirait plutôt à penser que le filet suivant lequel passe les rayons devient conducteur, et que les ions sont transportés par les rayons suivant le principe connu. On sait, en effet, que les radiations exercent sur tout corps qui les absorbe ou les réfléchit partiellement un effort proportionnel à la puissance arrêtée par le corps et inversement proportionnel à la vitesse de propagation du rayon. Il faut convenir, toutefois, que cette théorie semble insuffisante. Celle de MM. Benoist et Hurmuzescu est plus simple.

34. Durée de l'extinction des rayons. — MM. J. Chappuis et E. Nugues ayant installé sur la tige d'un interrupteur Foucault, monté en trembleur rapide, une fente étroite derrière laquelle on recevait, sur une plaque photographique, les rayons émanés d'un tube placé à une distance de 16^{cm}, on reconnut qu'après 36000 passages de la fente, l'image photographique était parfaitement nette. Si l'on admet que l'on puisse commettre, sur l'estimation de la position des bords de la fente, une erreur de $0^{mm},2$, on conclut de cette expérience, étant données les constantes de l'appareil, que la durée d'extinction des rayons est inférieure à un dix-millième de seconde.

Nous savons, par les mesures de M. J.-J. Thomson sur

les rayons cathodiques, que la durée de la période initiale de l'excitation lumineuse dans les tubes peut être réduite au-dessous d'un millionième de seconde, par un dispositif convenable, la durée d'extinction de l'émission visible étant toujours beaucoup plus considérable. La durée d'extinction des écrans actionnés par les rayons X n'a pas encore été mesurée.

Nous savons, en tout cas, par ces expériences, que l'action primaire des rayons est très subite. On se trouverait alors dans les conditions où, suivant le capitaine Abney, on augmenterait l'action photographique dans une proportion beaucoup plus forte que l'éclairement de la plaque.

35. Transmission des rayons X. — Les trois réactions caractéristiques des rayons X — actions lumineuses, photographiques et électriques — ont été employées à l'étude de la transmission de ces rayons dans les corps. Chacune des méthodes possède des avantages particuliers. La première donne avec une grande simplicité des résultats qualitatifs. La seconde sera employée avec avantage pour l'étude des lois de la réfraction et de la réflexion des rayons. La troisième, qui est en même temps la plus sensible et la plus propre aux mesures, servira surtout à déterminer les facteurs qui influent sur la transmission des rayons dans les corps, ou, plus généralement, dans tous les cas où les recherches porteront particulièrement sur l'intensité des phénomènes.

M. Chabaud a confirmé la grande opacité du platine aux rayons X; il a trouvé que le mercure se comporte d'une façon à peu près identique, tandis que la plupart des autres métaux présentent une transparence appréciable.

D'après M. Chabaud, les verres à luminescence jaune ou verte sont assez transparents, tandis que le cristal à base

de plomb, dont la luminescence est bleue, est doué d'une très grande opacité. Cette propriété suffit pour expliquer le peu d'action des tubes en cristal. Le verre d'urane possède une transparence comprise entre celles du verre ordinaire et du cristal.

M. Meslans a trouvé que le carbone et ses composés, avec l'hydrogène, l'oxygène et l'azote, sont généralement très transparents ; mais l'addition d'un métal ou d'un métalloïde à une molécule organique augmente beaucoup son opacité. Ces résultats ont été confirmés par toutes les recherches ultérieures. On s'explique ainsi pourquoi les chairs sont aisément traversées par les rayons, alors que les os le sont beaucoup moins. La seule différence de densité est, en effet, loin de rendre compte de la différence de transparence de ces organes.

Il faut toutefois faire exception pour les substances qui composent les milieux de l'œil, si transparents aux rayons du spectre visible. D'après MM. de Rochas et Dariex, ces milieux présentent aux rayons X des opacités diverses, mais assez fortes. On sait, du reste, que l'opacité du cristallin limite seule le spectre visible du côté du violet.

On pouvait conclure des mesures de MM. Meslans et Chabaud que le diamant et le jais, qui n'est autre chose qu'un lignite, sont beaucoup plus transparents que leurs imitations obtenues en général avec un cristal à l'oxyde de plomb. MM. Gascard et Buguet ont confirmé cette idée par des expériences directes, qui ont révélé une grande différence d'opacité entre les diamants vrais ou faux, les jais naturels ou imités.

Les mêmes principes permettent de déceler un grand nombre de falsifications de substances organiques dont il suffit de posséder de très petites quantités. M. Ranwez a pu, par ce moyen, reconnaître immédiatement l'adulté-

ration du safran par du sulfate de baryum; on trouverait, de la même façon, la teneur du caoutchouc ou des soies en substances minérales qu'on y incorpore pour en augmenter la masse.

MM. Girard et Bordas ont employé les rayons de Röntgen à révéler la structure d'engins explosibles divers, sans danger pour l'opérateur chargé de cette besogne, particulièrement délicate dans le cas d'appareils secrets; ils ont pu, non seulement découvrir des cavités suspectes dans des objets d'apparence inoffensive, mais encore caractériser, par leur opacité, certains explosifs, tels que les poudres chloratées, les nitro-celluloses, ou le fulminate de mercure.

Enfin, MM. Battelli et Garbasso, qui ont examiné un grand nombre de corps, ont reconnu, à peu d'exceptions près, que l'ordre des opacités était aussi celui des densités; mais la première de ces propriétés varie beaucoup plus vite que la seconde. On remarquera toutefois que le cristal, le spath fluor, le quartz, qui sont très opaques, ne figurent pas dans leur Tableau, dont ils troubleraient certainement l'ordonnance.

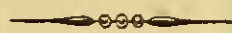
C'est dans la poursuite de ces études combinées avec l'examen des diverses radiations émanées du tube que l'on trouvera sans doute les applications pratiques les plus fructueuses de la méthode.

36. Composition des rayons X. — Cette propriété si importante des rayons n'a été que peu étudiée jusqu'ici; toutefois, les expériences faites avec des tubes différents ou avec le même tube montrent que ces rayons ne possèdent pas tous au même degré le pouvoir de traverser les corps semi-transparents. Ainsi, MM. Benoist et Hurmuzescu ont trouvé, pour un même tube, que la proportion de la radiation transmise par l'aluminium, ramenée à une

lame de $0^{mm},1$, variait suivant l'épaisseur d'où elle était déduite, en supposant la loi d'absorption représentée par une seule exponentielle. Ils ont trouvé, pour un même tube, des coefficients de transmission de l'aluminium compris entre 0,85 et 0,9, l'unité de longueur étant $0^{mm},1$. Un autre tube a donné un coefficient égal à 0,78. Enfin, M. Röntgen ayant obtenu un effet mesurable au travers d'une plaque d'aluminium de 15^{mm}, il paraît certain que les rayons recueillis derrière la plaque avaient un coefficient de transmission encore plus considérable. En supposant que ce coefficient fût égal à 0,9 pour les rayons dont parle M. Röntgen, on n'aurait dû retrouver, derrière la plaque, que le dix-millionième environ de la radiation primitive ; l'action aurait sans doute été insensible.

MM. Benoist et Hurmuzescu en concluent que les rayons X forment un ensemble hétérogène, comme une sorte de spectre ; cette conclusion était probable *a priori*. Il en résulte que les coefficients de transmission ne sont comparables que s'ils se rapportent à des rayons identiques.

Nous avons indiqué déjà, comme un fait probable, que la sensibilité relative des écrans phosphorescents varie suivant le tube au moyen duquel on les actionne. Plusieurs observateurs ont trouvé, en outre, des différences analogues entre l'action lumineuse et l'action photographique. Les tubes doivent être adaptés spécialement à l'un ou l'autre des effets que l'on veut obtenir. S'il est vrai que les rayons X soient de même nature que les « rayons de décharge » étudiés par M. Wiedemann, leur complexité résulterait déjà de ses expériences.



CHAPITRE VII.

ESSAI DE THÉORIE.

37. Rayons cathodiques. — Nous considérerons maintenant comme suffisamment établi que, dans l'ensemble des phénomènes que nous venons de décrire, les rayons cathodiques jouent simplement le rôle d'excitateurs des rayons X, mais possèdent des propriétés bien distinctes de celles de ces derniers. Si donc on se borne à étudier la nature du phénomène sans remonter à ses causes, on pourra séparer entièrement la théorie de ces deux espèces de rayons.

Quelques-unes des objections faites à la théorie matérialiste des rayons cathodiques provenaient de ce qu'ils avaient été souvent mélangés de rayons Röntgen. Cela ne paraît pas douteux pour certaines expériences de M. Goldstein et de M. Lenard que nous avons rapportées.

Les faits positifs qui ont conduit à la théorie du bombardement sont suffisamment établis pour que nous n'ayons pas à y revenir. Il nous suffira de réfuter quelques-unes des objections faites à cette théorie.

Nous avons montré déjà (**24**) que les arguments tirés de l'absence d'un déplacement des raies ne conduit pas à admettre qu'il n'y ait pas un mouvement rapide des molécules au voisinage de la cathode; suivant M. Goldstein,

l'effet lumineux ne se produit que lorsque les rayons, primitivement invisibles, rencontrent un obstacle solide (**19**). Hertz a étendu cette idée à une vapeur localisée dans le tube (**21**). Enfin, M. Lenard a montré que la luminescence pouvait aussi se produire dans l'air autour de la fenêtre de l'appareil (**22**). Les solides frappés par les rayons n'effectuent certainement aucun mouvement d'ensemble. Quant aux gaz possédant une densité appréciable à l'endroit où ils absorbent les rayons, ils se comportent suivant les principes de la théorie cinétique. Les premières molécules frappées par les rayons prennent une grande vitesse de translation, qui se répartit, sur un espace très court, entre les molécules voisines.

Hertz avait pensé pouvoir conclure de ses expériences sur l'action électromagnétique que la décharge ne passe pas par les rayons cathodiques. Modifions cette conclusion en disant qu'il se dissipe, par ces rayons, une très petite partie de la charge de la cathode; nous serons alors également d'accord avec le résultat négatif de Hertz et les expériences positives de M. Perrin; ces dernières sont, en effet, seulement qualitatives, et la faible capacité d'un électromètre permet de déceler le transport convectif d'une très petite quantité d'électricité; la charge relativement considérable des ions libres permet de supposer que cette électricité est liée à une quantité de matière prodigieusement faible.

On pourrait objecter aux conclusions de M. Perrin les arguments que fournissent les rayons X eux-mêmes, dont l'action électrique est bien nette ; le changement de la décharge produite par ces rayons en une charge observée par M. Perrin s'expliquerait à la rigueur par une perturbation. Mais alors on ne pourrait plus rendre compte du fait que le phénomène disparaît lorsqu'on éloigne les rayons cathodiques de *l'entrée* de la cage.

L'énorme vitesse des rayons ne doit pas surprendre; M. J.-J. Thomson a montré, par un calcul élémentaire, qu'elle résulte des forces très considérables en jeu au voisinage de la cathode.

D'autre part, il est suffisamment établi que les gaz peuvent être électrolysés, et que, même en dehors de toute action électrique, la lumière ultra-violette provoque leur décomposition et la rupture de la molécule en ions libres. Ce n'est donc plus à la molécule que nous avons affaire, mais bien à l'atome isolé. La théorie cinétique ne tient pas compte de ce nouvel élément, et le calcul du chemin moyen ne s'y applique pas. Il nous semble donc que l'objection de M. Goldstein, tirée du fait que le rayon cathodique se propage bien au delà de ce que le calcul indique, tombe d'elle-même du moment où l'on substitue l'atome à la molécule.

La même substitution explique la facilité avec laquelle les rayons cathodiques traversent les corps solides; la remarquable proportionnalité, découverte par M. Lenard, entre l'extinction et la masse traversée, sans action sélective, sera une conséquence de l'hypothèse mécanique.

Nous avons vu que, dans un électrolyte liquide, les ions traversent sans résistance appréciable des feuilles minces de métal; ici, la théorie matérialiste semble irréfutable. On accordera dès lors sans peine aux ions tirés de la molécule gazeuse les mêmes propriétés.

N'oublions pas que les atomes formant le support des rayons cathodiques sont animés d'une vitesse de 200 kilomètres par seconde, et que 1 gramme de matière doué de cette vitesse posséderait la même énergie cinétique qu'une locomotive de plus de 60 tonnes lancée à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure. On admettra sans difficulté que ces atomes traversent une feuille de métal imperméable

aux molécules possédant seulement la vitesse moyenne que leur assigne la théorie cinétique.

D'où provient cette dissociation des gaz contenus dans le tube ? Il n'est pas difficile d'en trouver la cause.

On sait, depuis longtemps, qu'il est des tubes de Hittorf récalcitrants, impossibles à actionner seuls, et qui deviennent lumineux sous l'influence d'une autre ampoule. MM. Wiedemann et Ebert ont trouvé aussi que la lumière ultra-violette a une action notable sur l'éclat d'un tube, au début de l'expérience ; cette action va en s'affaiblissant, et, lorsque le tube est en pleine marche, elle cesse complètement.

Ce phénomène s'accorde absolument avec le fait que la lumière ultra-violette ionise les gaz. Un tube est isolant lorsqu'il ne contient pas un nombre suffisant d'ions libres. Dès qu'on en a produit dans son intérieur, la décharge passe, et le même état s'entretient de lui-même soit par la lumière ultra-violette qui existe généralement dans le tube, soit par les rayons de Röntgen; nous savons, en effet, sans préjuger de leur nature, qu'ils produisent l'ionisation des gaz qu'ils traversent.

Il ne nous reste que quelques mots à dire d'une ingénieuse théorie émise par M. Jaumann, avant la découverte de M. Röntgen.

L'idée de M. Jaumann a pour point de départ l'observation qu'il fit, il y a quelques années déjà, d'une sorte de surface d'interférence entre deux cathodes parallèles. Cette surface occupe exactement le plan moyen entre ceux des électrodes négatives lorsque les fils qui y conduisent ont exactement la même longueur ; le phénomène devient, au contraire, diffus si les chemins sont différents. Les dimensions de son appareil conduisent M. Jaumann à attribuer

aux rayons une durée d'oscillation de l'ordre du milliardième de seconde.

M. Jaumann part ensuite de l'hypothèse que le pouvoir inducteur spécifique et la perméabilité magnétique de l'espace traversé par des décharges électriques sont variables. Il est ainsi amené à ajouter aux équations de Maxwell des termes qui contiennent les dérivées de ces quantités, et que l'on avait considérés comme nuls.

L'une des conséquences de cette idée est précisément l'existence d'ondes longitudinales dans les gaz raréfiés soumis aux décharges électriques. Ces ondes seraient de natures diverses, suivant les conditions de leur production, et posséderaient quelques-unes des propriétés des rayons cathodiques. Mais les hypothèses primitives de M. Jaumann ne rendent pas compte de tous les phénomènes. Suivant M. H. Poincaré, les équations de M. Jaumann représentent des rayons qui suivraient les lignes de force et ne seraient pas déviés par l'aimant.

M. Jaumann a cru pouvoir répondre à ces critiques. Mais la discussion revêt un caractère mathématique trop spécial pour qu'il soit possible d'en donner ici l'analyse.

38. Rayons X. — Les trois idées par lesquelles on a cherché à expliquer les rayons cathodiques se retrouvent dans la théorie des rayons X. Si invraisemblable que soit la théorie matérialiste de ce phénomène, on y a encore eu recours au début des travaux auxquels il a conduit [1]. Nous

---

[1] Dans un article paru dans *Electrical Review* (11 et 18 mars 1896), où il décrit de très remarquables expériences sur lesquelles nous reviendrons, M. Tesla développe l'hypothèse matérialiste des rayons X. Il voit la preuve de cette idée dans le fait que ces rayons, traversant le cerveau d'une personne, produisent la somnolence avec une sensation de chaleur et l'impression que le temps s'écoule rapidement; il faut convenir que cette preuve est bien détournée. M. Tesla pense, en outre, que l'on pourrait employer les

avons vu que l'on pouvait, en effet, considérer, avec une apparence de vraisemblance, les rayons X comme un cas particulier des rayons cathodiques possédant un minimum des propriétés qui les caractérisent. L'absence de déviation par l'aimant, vérifiée avec beaucoup de soin par M. Oliver Lodge, s'expliquerait par la décharge complète des particules électrisées traversant le tube de Crookes. Il nous semble, toutefois, que la prodigieuse perméabilité des corps pour ces rayons et l'absence de diffusion en dehors du tube, alors qu'elle est complète dans ses parois, opposent un insurmontable obstacle à leur théorie matérialiste.

Les vibrations longitudinales, telles que les a imaginées M. Jaumann, ne s'adaptent pas mieux à plusieurs des propriétés essentielles de ces rayons. Cependant, cette idée, sous sa forme la plus générale, ne doit pas être rejetée sans examen.

Bien que, dans le Mémoire provisoire de M. Röntgen, l'idée de l'oscillation longitudinale ne soit appuyée d'aucun raisonnement, le seul fait que l'éminent professeur l'a émise comme possédant un certain degré de probabilité, lui donne, en cette occasion, une très grande importance. Comme le dit M. Lodge, « il faut écouter celui qui vit au milieu des phénomènes, parce qu'il peut souvent sentir intuitivement plus qu'il ne pourrait justifier et établir logiquement ». Jusqu'ici nous ne possédons guère que des ébauches de théories de rayons X, basées sur l'hypothèse des ondes longitudinales; on ne peut, en effet, attribuer

---

rayons X pour faire pénétrer, à l'intérieur du corps, des substances médicinales; le procédé des injections hypodermiques serait ainsi poussé à la perfection; cette méthode est encore suspendue à un fil bien ténu. Les expériences de M. Lafay ont ramené, pour un instant, à la théorie matérialiste, mais le fait que le rayon est électrisé en amont de la plaque aussi bien qu'après l'avoir traversée, rend fort improbables les conclusions que l'on pensait pouvoir tirer des premières expériences

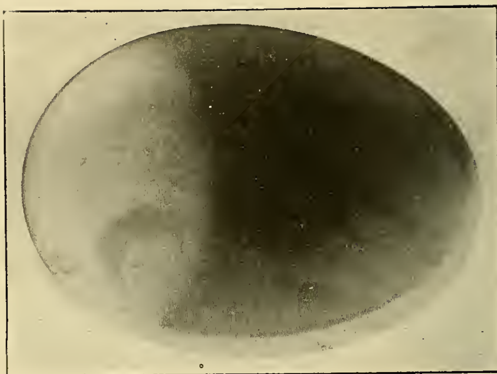
au milieu dans lequel elles sont engendrées que des propriétés en concordance avec celles du phénomène dont on veut rendre compte; et il faut reconnaître que celui dont nous nous occupons est encore bien mal connu.

M. J.-J. Thomson a montré récemment que les ondes longitudinales peuvent prendre naissance dans un milieu contenant des ions chargés en mouvement, ou bien aussi dans tout autre milieu dans lequel l'éther se déplace; la longueur des ondes possibles est alors de l'ordre de grandeur des particules matérielles qui se trouvent dans ce milieu. Des ondes de cette espèce ne seraient pas réfractées; mais nous avons vu qu'il en serait de même de toutes les ondes extrêmement courtes.

Nous ne poursuivrons pas davantage l'étude des ondes longitudinales qui ont déjà fait de courtes apparitions dans la Science, en présence d'un grand nombre de phénomènes nouveaux [1]. Il est une opinion, émise pour la première fois par Newton, et qui a été reproduite à diverses reprises, c'est que les ondes de compression de l'éther seraient probablement capables d'expliquer la gravitation et la cohésion, les plus mystérieux de tous les phénomènes naturels. Il serait donc prudent de garder en réserve ces ondes encore inconnues tant que l'on pourra se dispenser de les faire intervenir dans d'autres phénomènes. Le cas des lumières nouvelles ne semble pas encore désespéré.

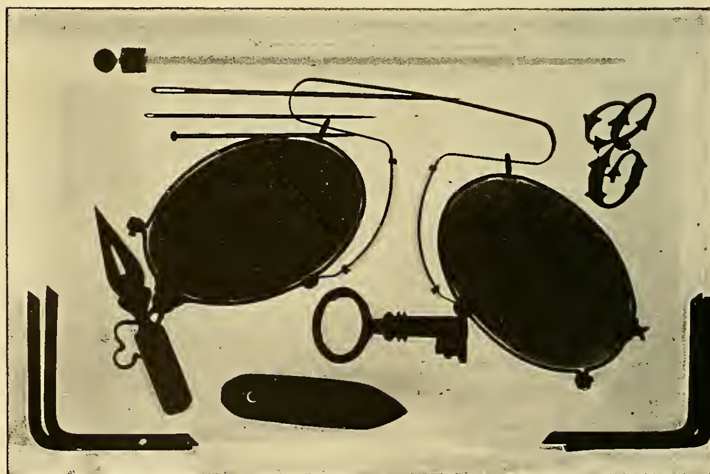
Quels sont les arguments que l'on oppose à l'idée que les

[1] Après que Fresnel eut définitivement abandonné cette idée pour l'explication des phénomènes lumineux, et fondé la théorie des ondes transversales, Cauchy y revint le premier pour chercher à représenter l'énergie de la vibration de l'éther qui apparaît seulement sous forme de chaleur — la chaleur rayonnante — qu'il considérait, avec tous ses contemporains, comme différente de la lumière : « Puisque les vibrations transversales qui s'exécutent sans que la densité varie représentent la lumière, il ne reste, pour représenter la chaleur, que les vibrations longitudinales, ou, ce qui revient au même, les vibrations accompagnées d'un changement de densité. »



ŒUF DE POULE CONTENANT UN POUSSIN.
RADIOGRAPHIE OBTENUE A L'AIDE D'UN TUBE A FOYER DE PLATINE.

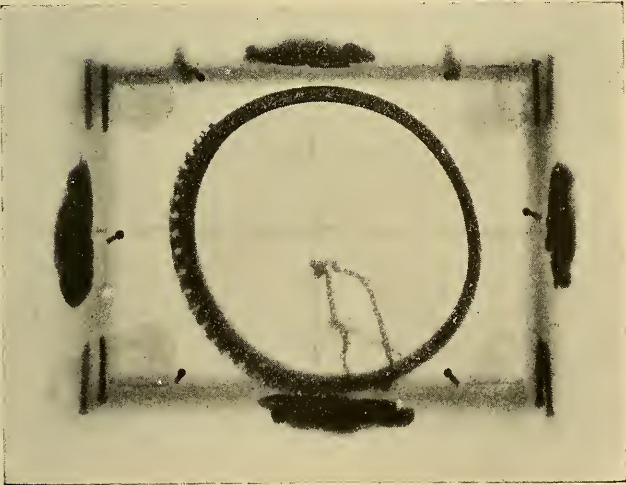
Épreuve de M. J. Chappuis.



PORTEFEUILLE CONTENANT DIVERS OBJETS.

Radiographie exécutée par M. E. Colardeau, au moyen du tube spécial *fig.* 18.





BOITE EN BOIS ASSEMBLÉE AVEC DE PETITS CLOUS EN FER.

Photographie à la lumière ordinaire
et radiographie montrant le contenu de la boîte.

Épreuves de M. Albert Londe.

rayons de Röntgen sont dus à des vibrations transversales de très faible longueur d'onde?

En premier lieu, l'absence de réfraction et la transparence surprenante des corps considérés comme les plus opaques à tout mouvement vibratoire.

Mais nous avons vu que la question d'opacité est très relative et semble soustraite à toute loi générale. L'eau est opaque dans l'infra-rouge, l'argent est transparent dans l'ultra-violet, tandis que le verre y est d'une remarquable opacité. Les matières colorantes, telles que la fuchsine ou le rouge de Magdala, présentent une bande d'absorption bien délimitée, à l'intérieur de laquelle elles sont très opaques, pour redevenir transparentes de part et d'autre de cette bande (6). En même temps, l'indice de réfraction subit des variations bien différentes de celles qu'indiquent les lois ordinaires de la réfraction : augmentation régulière de l'indice vers les faibles longueurs d'onde. Les expériences et les théories connues avant la découverte des nouveaux rayons prennent, à ce point de vue, une très grande importance; sans l'addition d'aucune hypothèse, elles montrent que, pour les très faibles longueurs d'onde, les corps doivent tendre vers la transparence, en même temps que leur indice doit s'approcher de l'unité [1].

Quant à une relation quelconque entre la densité et l'opacité, que M. Röntgen avait cru pouvoir déduire de ses premières recherches, elle n'a pas été confirmée par les expériences ultérieures. Sans doute, des corps très denses, comme le platine ou le mercure, restent fortement absorbants, mais cette coïncidence peut n'être que fortuite. Ainsi, les verres à base de plomb dont la densité n'est pas

---

[1] Cette remarque a été utilisée pour la première fois par M. C. Raveau dans l'explication du phénomène qui nous occupe.

très élevée, sont aussi d'une assez grande opacité. Les actions sélectives, que M. Röntgen avait déjà indiquées, sont peut-être beaucoup plus importantes qu'il ne le pensait.

Cette propriété des corps donne lieu à des vérifications inattendues, si l'on part de l'idée que les rayons X sont dus à des oscillations transversales très rapides.

Le spath fluor, qui est d'une transparence parfaite dans toute la région du spectre explorée jusqu'ici, présente une grande opacité aux rayons X; or M. Carvallo, appliquant à ce corps les équations de Ketteler, trouve une remarquable concordance entre les résultats des mesures d'indice et ceux du calcul, s'il admet que ce corps possède une bande d'absorption voisine de la longueur d'onde $0^{\mu},1$ (1).

Sans vouloir, pour le moment, attribuer une importance trop grande aux mesures de M. Perrin, qui, comme nous l'avons indiqué, ont pu être troublées par l'absorption, on remarquera que le sens de l'indice de l'aluminium pour les rayons X concorde avec les prévisions de la théorie pour la lumière ultra-violette.

L'absence d'interférence semble, *a priori*, opposée à l'idée d'un phénomène analogue à ceux de l'Optique. Mais il ne faut pas oublier que les procédés employés pour découvrir ces interférences ne les auraient pas fait apparaître dans le cas de vibrations deux ou trois fois plus rapides que celles avec lesquelles on a opéré jusqu'ici.

Nous avons vu, enfin, que la lumière ultra-violette, comme les rayons X, décharge les corps électrisés, et que, dans l'un et l'autre cas, on peut attribuer le phénomène à

---

(1) E. CARVALLO, *Spectres calorifiques* (*Annales de Chimie et de Physique*, 7e série, t. IV; p. 1, 1895). Partant de la formule suivante :

$$n^2 = a + \frac{b}{\lambda^2 - c} + d\lambda^2,$$

M. Carvallo a trouvé $c = +0,0090$, l'unité étant le micron.

l'ionisation du gaz ambiant. Cette analogie, ajoutée aux autres, est d'autant plus importante que cette action est plus singulière. Il existe, sans doute, une certaine différence dans le mode d'action des deux espèces d'énergie, puisque, dans un cas, les corps isolés chargés négativement sont seuls déchargés, alors que, dans l'autre, ils le sont tous indifféremment. Toutefois, il ne faudrait pas s'arrêter à de tels détails, tant que des différences de cette nature resteront isolées. Ces propriétés des radiations pourraient aller en s'accentuant à mesure que les longueurs d'onde se rapprochent des dimensions moléculaires.

N'oublions pas que le mode d'action très différent des ondes infra-rouges, visibles et ultra-violettes, sans parler même des ondes électriques, avait conduit les anciens physiciens à admettre l'existence de trois espèces distinctes de rayons (1), et que la première preuve de leur identité a été trouvée dans la coïncidence des raies dans les trois spectres.

On a voulu voir un argument de plus dans le fait que les rayons X provoquent la *fluorescence;* mais il ne faudrait pas insister trop sur cette nouvelle coïncidence; le phénomène est, en effet, infiniment plus compliqué qu'on ne le pensait d'abord. Les actions lumineuses des rayons X sont, du reste, le plus souvent *phosphorescentes* et non fluorescentes.

Quant à l'augmentation de conductibilité de certains corps solides, sous l'action des rayons X, on peut la rapprocher des phénomènes présentés par le sélénium.

Les analogies entre les rayons X et la lumière sont si nombreuses que l'on est tout naturellement conduit à admettre l'identité de principe entre ces radiations qu'un examen superficiel fait paraître si différentes.

On devra maintenant imaginer et réaliser les expériences propres à mettre cette idée à l'épreuve. La répétition

des expériences ordinaires de l'Optique avec les nouveaux rayons serait un bon argument en faveur de leur identité avec les vibrations lumineuses. Les phénomènes ont été sans aucun doute rendus diffus par le fait qu'on n'a utilisé jusqu'ici les rayons X qu'en dehors du tube à vide. Mais supposons que les rayons cathodiques, frappant un obstacle quelconque à l'intérieur du tube, donnent naissance à un spectre complet et très étendu; on ne percevra, à l'extérieur, que les portions de ce spectre non absorbées par le verre, c'est-à-dire les radiations visibles, avec les premières radiations ultra-violettes, et les radiations de très courte longueur d'onde pour lesquelles tous les corps doivent être perméables.

On contrôlerait aisément cette idée en étudiant le spectre à l'intérieur du tube; l'emploi des nouvelles ampoules à foyer métallique intérieur, que nous allons décrire, rendrait ces études particulièrement commodes et fructueuses. M. Wiedemann a déjà reconnu que, parmi les radiations existant à l'intérieur des tubes, les unes traversent le quartz ou le spath fluor, d'autres sont arrêtées par ces cristaux. C'est là, croyons-nous, l'ébauche des expériences qui nous renseigneront sur la vraie nature des rayons nouveaux.

Les recherches peuvent être longues et difficiles. Il ne faut pas oublier, en effet, que l'Optique entière s'est échafaudée lentement, et que plus d'une découverte est due à la circonstance fortuite que certains cristaux sont doués de propriétés particulières. Supprimons tel corps de l'ensemble de ceux que nous fournit la nature, on supprimera du même coup la connaissance de tel phénomène important : celui de Hall, par exemple.

CHAPITRE VIII.

APPLICATIONS.

39. Sources d'énergie électrique. — Les expériences de recherches sur les tubes à vide ont été faites, le plus souvent, à l'aide de la bobine d'induction. Certains observateurs, toutefois, se sont servis de la machine statique, ou de piles puissantes. Warren de la Rue et Hugo Müller, par exemple, au cours de leurs recherches classiques sur les décharges dans les gaz, augmentèrent successivement le nombre de leurs éléments au chlorure d'argent, jusqu'à dépasser le chiffre de 14 000.

L'emploi de sources à courant continu et à débit relativement grand présente de sérieux avantages pour les études théoriques; mais le potentiel exigé par les expériences sur les nouveaux tubes rendrait, le plus souvent, ces sources impraticables. Tous les opérateurs qui travaillent avec un vide élevé se servent soit de bobines d'induction, soit, très exceptionnellement, de machines statiques à grand débit.

Dans la bobine d'induction, un circuit primaire, en gros fil, agit sur un circuit secondaire d'un grand nombre de spires de fil généralement très fin. L'ingénieux système d'enroulement imaginé par Ruhmkorff permet d'éviter les grandes différences de potentiel entre les points les plus voisins à l'intérieur de la bobine.

Le courant, dans le circuit primaire, étant successivement établi et interrompu, la même quantité d'électricité traverse deux fois, en sens inverse, la bobine secondaire lorsqu'elle est fermée sur un circuit métallique; mais, grâce à l'induction propre du système, le courant de rupture donne lieu à une variation de potentiel beaucoup plus forte que le courant de fermeture; si le circuit de la bobine contient un intervalle à étincelle ou tout autre organe susceptible de développer une résistance de la nature d'une force contre-électromotrice, le courant de faible potentiel est arrêté, tandis que l'autre passe à chaque interruption. C'est ainsi que la bobine, bien que devant donner des courants symétriques, possède une polarité, et envoie en général des courants interrompus toujours de même direction, toutes les fois qu'elle est en circuit avec un intervalle d'air suffisamment étendu ou un tube à vide.

Le courant, dans le circuit primaire, est interrompu par un organe spécial, qui revêt des formes différentes suivant l'usage auquel on le destine. Le plus anciennement employé se compose d'une roue avec des secteurs alternativement conducteurs et isolants; le corps de la roue est en métal, et reçoit le courant d'un balai frottant sur son axe. Un autre balai est à la périphérie. Cet interrupteur fonctionne d'une façon parfaitement régulière, et permet d'atteindre les vitesses d'interruption les plus diverses. Il présente l'inconvénient d'exiger un moteur séparé, ce qui augmente notablement le prix de la bobine.

Foucault a imaginé un autre interrupteur consistant essentiellement en un ressort vertical portant un fléau horizontal muni, d'un côté, d'une tige de platine, de l'autre, d'un morceau de fer doux. Au repos, l'extrémité du fil de platine se trouve à proximité d'une surface de mercure recouverte d'alcool absolu bien propre. Pour actionner la

bobine, on plonge le fil de platine dans le mercure ; aussitôt, le faisceau de fil de fer qui se trouve au centre de la bobine est aimanté et attire l'extrémité du fléau. Celui-ci se redresse brusquement et l'interruption se produit. Le fléau, n'étant plus attiré, revient en arrière, le fil de platine plonge de nouveau dans le mercure, et ainsi de suite.

On peut faire varier entre des limites assez étendues la période de l'interrupteur en changeant, à l'aide d'une masse mobile, son moment d'inertie ; toutefois, l'interrupteur Foucault est surtout destiné aux alternances peu rapides.

L'interrupteur à marteau dérive du Foucault ; il en diffère essentiellement en ce que le contact s'établit entre une garniture de platine de la pièce mobile et une contre-plaque métallique fixe.

Cet interrupteur permet les interruptions très rapides, surtout sous la forme que lui a donnée M. Marcel Deprez, et que construit M. Carpentier. Le plus gros défaut de l'interrupteur à marteau réside dans l'usure rapide du platine. Ce métal est brûlé par l'étincelle de rupture, et le trembleur se dérègle rapidement. M. Gaiffe fait tourner la contre-plaque au moyen d'une petite dynamo actionnée par une dérivation du courant primaire. De cette manière, l'usure est plus régulière et le réglage peut se conserver longtemps.

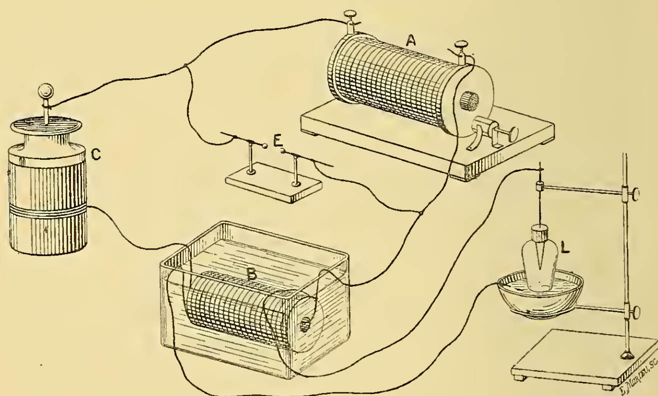
Les interruptions les plus rapides sont obtenues à l'aide d'une corde d'acier, actionnée par un électro-aimant dont elle coupe elle-même le circuit. L'excitation est ainsi synchrone au mouvement de la corde et exige une très faible quantité d'énergie. On règle la vitesse en fixant, par un chevalet, la longueur libre de la corde. L'interruption se fait, comme dans le Foucault, à l'aide de deux petits go-

dets à mercure, dans lesquels plongent des tiges de platine. Cet interrupteur est dû à M. W. Wien.

Les oscillations électriques, dont l'étude a pris depuis quelques années une si grande importance, peuvent aussi être utilisées pour actionner les tubes à vide. Les premiers appareils destinés à produire les courants oscillatoires de haute fréquence et de grande intensité ont été construits par M. d'Arsonval et M. Tesla.

La *fig.* 15 montre le principe d'un de ces appareils. Une bobine de Ruhmkorff A est en circuit avec une autre bo-

Fig. 15.



bine B noyée dans l'huile; un excitateur à étincelles E est mis en dérivation sur le circuit. La bobine A charge le condensateur C qui se décharge à travers la bobine B et l'excitateur. Si les constantes du deuxième circuit ont été convenablement choisies, la décharge est oscillatoire, chaque courant envoyé par la bobine A donnant naissance à une série d'oscillations rapides allant en s'amortissant.

Dans les appareils ordinaires, la fréquence de l'oscillation dans le deuxième circuit est comprise entre 100 000 et

1000000 par seconde. On recueille alors dans le secondaire de la bobine des courants de très haut potentiel, oscillatoires comme ceux qui les excitent, et qui passent dans les deux sens indifféremment lorsqu'on met un tube dans le circuit. Ces courants, de très grande fréquence, possèdent la singulière propriété de produire des actions physiologiques presque nulles.

40. Le tube. — Les premières ampoules employées pour l'étude des rayons de Röntgen ou pour leurs applications étaient assez semblables au modèle le plus ordinaire des tubes de Crookes, connu sous le nom de tube à croix (*fig.* 6). La croix est montée sur une charnière, et peut être aisément rabattue ou relevée; on projette ainsi, à volonté, une ombre sur la paroi anticathodique et l'on substitue l'anode au verre pour la transformation des rayons cathodiques en rayons X. C'est cette production accidentelle des rayons sur l'anode qui a pu faire croire à quelques observateurs que ces rayons émanent, *dans tous les cas*, de l'anode.

Les ampoules de la forme ordinaire présentent le défaut d'avoir une surface d'émission trop étendue, ce qui oblige à diaphragmer si l'on veut obtenir de la netteté; mais alors une partie des radiations sont produites en pure perte.

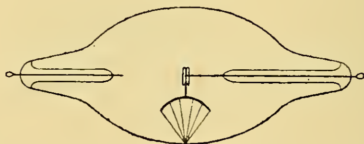
L'émission sur l'anticathode est rarement uniforme et il convient, avant de la diaphragmer, de se rendre exactement compte de la distribution d'intensité de la source, pour l'utiliser dans les meilleures conditions possibles. Voici l'ingénieux procédé que préconisent, dans ce but, MM. Imbert et Bertin-Sans : on forme un faisceau de tubes de 6^{mm} à 8^{mm} de diamètre intérieur, dont on applique les extrémités contre la surface du verre. On prend une épreuve du champ éclairé à l'autre extrémité de ces tubes; l'image

se compose alors d'une série de circonférences à l'intérieur desquelles l'impression est uniforme, tandis qu'elle diffère d'un cercle à l'autre. On reconnaît ainsi, d'un seul coup d'œil, les portions de l'ampoule qu'il convient d'utiliser, en satisfaisant le mieux possible aux deux conditions inverses d'intensité de l'action et de bonne définition des détails. On limitera, à l'aide d'un diaphragme qui n'est pas nécessairement circulaire, la partie la plus brillante de l'anticathode, et l'on placera l'ampoule à une distance de la plaque indiquée par les conditions de netteté et de rapidité auxquelles on se propose de satisfaire.

On peut éviter cette manipulation par une construction rationnelle des tubes; le procédé le plus simple consiste à créer un foyer de la cathode sur la paroi du tube lui-même; mais alors l'élévation de température qui se produit en cet endroit met rapidement le tube hors d'usage.

M. Wood évite cet inconvénient à l'aide de l'ampoule représentée dans la *fig.* 16. La cathode, suspendue à une

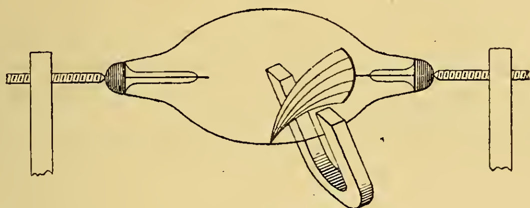
Fig. 16.



sorte de poulie, envoie toujours sa radiation dans la même direction; mais, tandis qu'on opère, on fait tourner le tube autour d'un axe horizontal, de façon à ce que la surface du verre s'échange constamment au point où se forme le foyer. Cet appareil présente quelques difficultés de construction; mais on peut utiliser la propriété des rayons cathodiques d'être déviés dans un champ magnétique pour projeter toujours dans la même direction le flux émané

d'une cathode à axe horizontal (*fig.* 17). Les extrémités de l'ampoule, étant munies de calottes de métal, peuvent être montées entre deux pointes qui amènent le courant; on communiquera de même une rotation lente à l'ampoule.

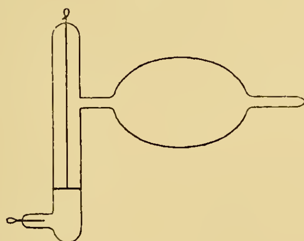
Fig. 17.



Dans ce dernier tube, la cathode peut être concave, mais cela n'est pas absolument nécessaire. M. Meslin a montré que, par l'emploi d'un champ magnétique *non uniforme,* on peut concentrer les rayons tout en déviant l'ensemble du faisceau; on amène ainsi, en un point de la paroi, le flux primitivement cylindrique émané de la cathode.

M. Colardeau est parvenu à obtenir des épreuves d'une remarquable netteté (celle du portefeuille reproduit par

Fig. 18.

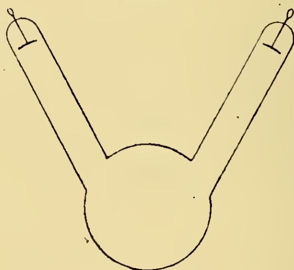


notre *Pl. III,* par exemple), à l'aide de l'ampoule que représente la *fig.* 18. La cathode ferme exactement le tube vertical, de manière à éviter tout foyer secondaire; l'antica-

thode se réduit alors à une petite surface au point le plus bas. Ce tube a la forme et les dimensions d'une cigarette; mais, pour éviter les variations de la pression qui ne manqueraient pas de se produire dans un espace aussi restreint, on a réuni l'ampoule à un réservoir latéral de plus forte capacité.

Les appareils que nous venons de décrire se prêtent mal à l'emploi des courants de Tesla; leur dissymétrie provoque la formation de deux foyers qui projettent deux images. On peut éviter cet inconvénient, en construisant, à l'exemple de MM. Benoist et Hurmuzescu, le tube

Fig. 19.



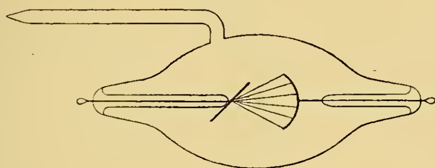
symétrique de la *fig.* 19, où les deux électrodes actionnent successivement le même point de la paroi.

On peut aussi mettre le secondaire de la bobine de Tesla en communication, d'une part, avec la douille d'une lampe Gérard, L (*fig.* 15), de l'autre, avec une petite capsule en celluloïd remplie d'eau, dans laquelle plonge la pointe de la lampe. On place au-dessous de la capsule le récepteur des rayons X. Ce dispositif a été employé avec succès par M. d'Arsonval.

Les tubes dont l'anticathode est en verre présentent quelques inconvénients sur lesquels nous reviendrons; c'est pourquoi on a cherché à produire les rayons X sur un

écran de métal placé à l'intérieur de l'ampoule (*fig.* 20). Ces tubes, connus en Angleterre et en Allemagne sous le nom de *focus* (tubes à foyer), donnent des effets très puissants. L'anticathode est généralement en platine. Dans l'idée de MM. Benoist et Hurmuzescu, l'emploi de ce métal serait motivé surtout par le fait que, absorbant fortement

Fig. 20.



les rayons X, il doit les émettre en abondance; cette ingénieuse déduction pourrait toutefois ne pas être vérifiée par l'expérience; nous devons admettre, en effet, que les particules du métal, vibrant sous l'action de chocs ininterrompus, exécutent des oscillations forcées, sans période définie, auxquelles les lois de la résonance cessent de s'appliquer. Dans le tube à foyer métallique, l'anticathode est généralement inclinée de 45° sur l'axe, de façon à participer aussi bien à l'action de la cathode qu'à l'émission dans les meilleures conditions de passage à travers la paroi.

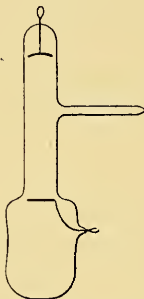
MM. Benoist et Hurmuzescu ont observé les rayons X en abondance à la face inférieure de l'anticathode en aluminium fermant l'entrée de la partie cylindrique du tube représenté par la *fig.* 21.

Dans les tubes à foyer de platine, il faut éviter soigneusement l'emploi des courants alternatifs, et même s'assurer toujours, au moment où l'on ferme le circuit de la bobine, que l'anticathode ne deviendra pas une cathode. La volatilisation de la lame de platine mettrait le tube rapidement hors d'usage.

Enfin, le professeur J.-S. Mac Kay, de Brooklyn, a construit un tube fort employé aux États-Unis, et qui semble donner des résultats très remarquables.

Ce tube, d'un diamètre de 20^{mm} à 30^{mm}, et d'une longueur totale de 15^{cm}, contient deux électrodes de cuivre en regard, à une distance de 3^{mm} seulement. Le vide a été poussé

Fig. 21.



aussi loin que possible, de telle sorte que l'étincelle passe souvent d'un fil à l'autre par l'extérieur.

Ce tube chauffe très peu, et donne des effets puissants, dont l'origine est dans sa portion moyenne. Il est, du reste, absolument sombre.

On peut admettre que les deux électrodes deviennent tour à tour des points d'émission; comme elles sont très voisines, il n'en résulte aucun inconvénient.

Le degré de vide a la plus grande influence sur le rendement de l'ampoule. Les rayons X semblent faire leur apparition au moment précis où, le vide étant poussé jusqu'à quelques millièmes de millimètre de mercure, les rayons cathodiques se manifestent par la première luminescence des parois. Les deux phénomènes augmentent graduellement, à mesure que le vide devient plus parfait; bientôt l'éclat visible atteint son maximum et commence à dé-

croître; au contraire, l'émission des rayons X augmente tandis que le potentiel explosif devient de plus en plus grand ; puis l'émission de rayons X passe par un maximum assez marqué, après lequel elle diminue très rapidement. Le développement de l'émission est représenté, suivant M. J. Chappuis, par une courbe semblable à celle de la

Fig. 22.

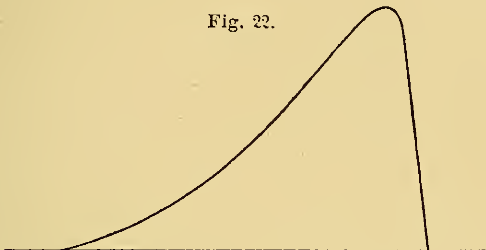


fig. 22, l'abscisse étant le degré de vide ou l'inverse de la pression.

Le phénomène pourrait, semble-t-il, s'expliquer de la manière suivante. Aussitôt que le bombardement moléculaire atteint les parois, l'émission commence dans toute l'étendue du spectre. La vitesse des atomes augmentant en même temps que la chute de potentiel, toute l'émission croît pendant un moment; puis le nombre des particules atteignant la paroi devient dé plus en plus petit; les effets dus à la quantité décroissent tandis que ceux qui résultent de la grande vitesse des particules vont encore en augmentant; c'est ainsi que les mouvements lents des particules du verre diminuent, alors que les mouvements rapides croissent, puis le phénomène cesse lorsque le courant ne met plus en mouvement de masses appréciables.

41. L'emploi du tube. — L'ampoule étant séparée de la trompe à mercure et scellée ne conserve pas un vide con-

stant. En général, surtout si l'anticathode est en verre, la pression monte peu à peu, et l'émission revient vers l'origine de la courbe. D'autres fois, surtout dans le cas des foyers métalliques, le gaz s'échappe ou est absorbé, de telle sorte que le courant ne passe plus.

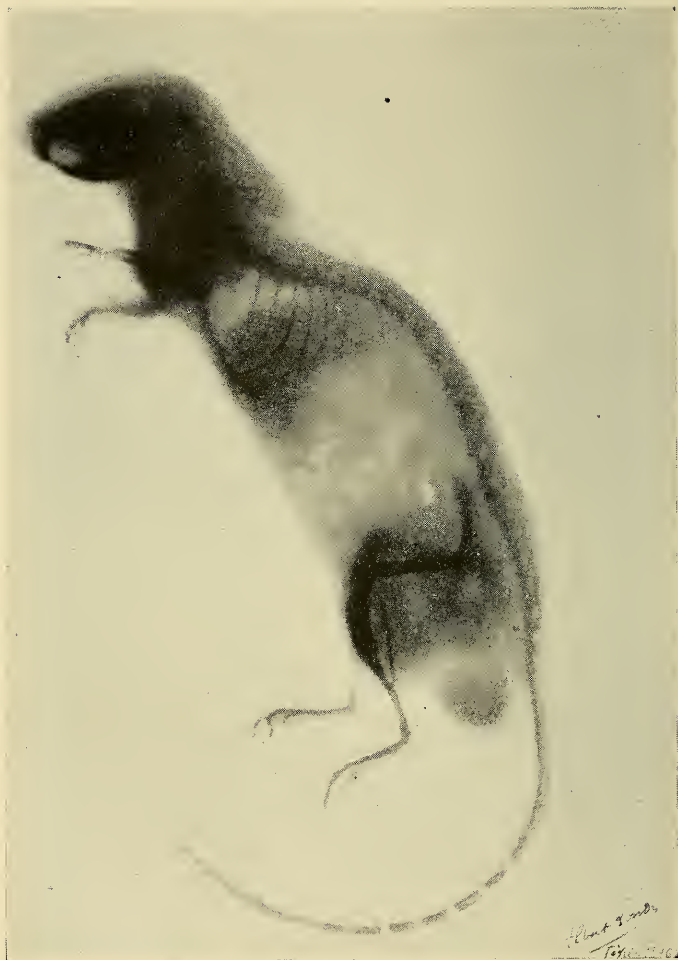
Plusieurs procédés peuvent être employés pour remettre les tubes en état de servir; le meilleur consiste évidemment à les laisser en permanence sur la trompe; mais il ne peut être recommandé qu'aux opérateurs ayant déjà une certaine pratique des appareils de physique.

Lorsqu'un tube se vide, ce qu'on reconnaît à ce que l'étincelle passe à l'extérieur, il suffit souvent de le chauffer sur une flamme d'alcool (et non sur celle d'un Bunsen, qui est trop vive) pour lui rendre ses qualités premières. Les gaz sont ainsi, tour à tour, absorbés et dégagés par le verre, et le tube est périodiquement détruit et remis en état. On peut aussi enfermer dans l'ampoule une substance capable soit d'absorber les gaz, soit de les rendre. M. Chabaud construit, depuis quelque temps, des ampoules contenant un fragment de potasse caustique et que l'on rince avec de l'acide carbonique avant de les vider. Les résidus de gaz sont absorbés par la potasse et restitués lorsqu'on chauffe le carbonate ainsi formé.

On pourrait avoir recours à d'autres gaz; toutefois, suivant les idées de MM. Benoist et Hurmuzescu, il y a intérêt à se servir d'un corps ayant une masse moléculaire élevée.

Le courant lui-même, convenablement gradué, permet de rendre aux tubes leurs qualités premières.

Voici quelques indications sur la manière d'en obtenir un service prolongé. Il convient d'abord de débuter par un courant peu intense, que l'on peut augmenter graduellement; on le contrôlera soit par un galvanomètre dans le circuit primaire, soit par un excitateur à étincelles



RADIOGRAPHIE D'UN RAT PAR LES RAYONS DE RÖNTGEN.

Épreuve de M. Albert Londe.



IMAGE D'UN RAT OBTENUE A LA LUMIÈRE ORDINAIRE.

Épreuve de M. Albert Londe.

en dérivation sur l'ampoule. Un tube manié avec précaution commence, en général, par s'améliorer. Au moment où il faiblit, on le ranime en renversant, pendant un instant, le sens de la décharge. Un autre procédé, indiqué par M. Carpentier, consiste à rapprocher l'excitateur à étincelles et à maintenir le tube en dérivation pendant un temps plus ou moins long sur un intervalle d'éclatement restreint, 1^{cm}, par exemple. Au bout d'un moment, on peut écarter de nouveau progressivement les boules et obtenir des effets égaux et même supérieurs à ceux que donnait le tube neuf.

Il paraît certain que les alternances de courant intense et modéré ont modifié en sens inverse la pression du gaz dans le tube. C'est aussi l'idée de M. Tesla; il pense même que le bombardement seul explique la sortie des gaz, tandis qu'on les fait rentrer dans d'autres conditions, par exemple en mettant les ampoules dans un champ électrique variable, sans que les électrodes soient en communication directe avec la source.

Indépendamment du gaz, le verre de la paroi anticathodique s'altère assez rapidement. Si même on ne déplace pas le foyer durant une expérience, il y a grand intérêt à changer, d'une expérience à l'autre, le point d'impact des rayons cathodiques à l'aide d'un aimant; peu à peu le verre se ternit et prend une teinte brunâtre. A ce moment, l'ampoule est définitivement hors d'usage.

Plusieurs observateurs pensent que certaines substances phosphorescentes, placées sur le trajet des rayons X, en augmentent l'effet. M. Piltchikoff a, l'un des premiers, obtenu des actions énergiques en plaçant les substances phosphorescentes dans des ampoules. M. Silvanus-P. Thompson recommande de recouvrir la paroi anticathodique d'un émail contenant du sulfure de calcium.

Toutefois, ce procédé est peu employé dans les tubes nouvellement construits, et il ne semble pas qu'il donne tout ce qu'on en attendait. D'une manière générale, l'action des substances phosphorescentes est très irrégulier, comme nous le verrons plus loin.

42. Applications photographiques. — Les lois des actions photographiques sont encore assez mal connues ; on sait bien, cependant, que l'action photographique d'une radiation donnée n'est pas seulement une fonction de la quantité totale de lumière qui a atteint le récepteur ; l'énergie nécessaire pour impressionner une plaque est d'autant plus grande que l'éclairement est plus faible ; en d'autres termes, si la lumière frappant la plaque est réduite au $n^{\text{ième}}$ de sa valeur, le temps de pose devra être augmenté plus de n fois.

De plus, un éclairage intermittent a moins d'action qu'un éclairage continu de même durée totale. Cet effet est d'autant plus marqué que l'éclairement de la plaque est plus faible. Or, nous avons vu, d'après les recherches de M. Chappuis, que l'extinction des rayons X est extrêmement rapide ; si leur intensité est faible, l'action est fortement réduite. On peut en conclure qu'un tube se fatiguera moins, pour un effet donné, si l'action est rapide que si elle est lente ; on aura ainsi tout intérêt à pousser les ampoules et à réduire le temps de pose [1].

Nous avons indiqué déjà des applications diverses de la Photographie à des cas particuliers. Nous signalerons encore des essais qui ont été faits pour découvrir des pailles ou des soudures dans les plaques métalliques, et qui ont,

---

[1] Suivant MM. Campanile et Stromei (*Académie de Naples*, 7 mars 1896), on augmente l'action en intercalant un intervalle à étincelles du côté de l'anode.

paraît-il, donné de bons résultats. Mais c'est surtout dans l'étude des organismes vivants que la méthode s'est montrée efficace. C'est même par la photographie des os de la main que M. Röntgen a rendu la méthode si rapidement populaire. Notre *Pl. I,* due à M. Albert Londe, le très habile chef du service photographique de la Salpêtrière, montre ce qu'on peut en attendre dans le cas de lésions chirurgicales peu profondes. On savait qu'une balle se trouvait logée dans la main; mais, d'après le docteur Delbet, la palpation la plus attentive ne révélait la présence d'aucun corps étranger. La photographie nous montre qu'il en existe deux, la balle s'étant peut-être partagée sur le troisième métacarpien, à moins qu'une lésion n'ait déterminé une exostose. Dans le cas actuel, où la blessure remontait à douze ans, l'ablation n'était pas nécessaire; mais, si elle avait été indiquée, à défaut de l'examen photographique, on se serait contenté d'enlever l'un des deux fragments de la balle, l'autre étant resté insoupçonné.

La méthode n'est limitée ni à des corps aussi volumineux qu'une balle, ni à des parties charnues aussi minces que la main. On a pu déterminer, par le nouveau procédé, la position exacte d'une aiguille ou d'un petit éclat de verre dans la main, la nature d'une fracture du bras ou de la jambe.

La position exacte d'un corps étranger se mesure aisément à l'aide de deux foyers dirigés successivement ou simultanément sur la même plaque, ou de deux épreuves formant entre elles un certain angle. MM. Imbert et Bertin-Sans, par exemple, laissent le tube sur la normale à la plaque photographique, et inclinent l'objet à photographier, lequel est appuyé sur une lame de métal percée d'une large ouverture, en regard de la région à étudier. Une première épreuve ayant été ainsi obtenue, on fait glisser la

plaque photographique, et l'on incline l'objet en sens inverse. La double épreuve, examinée au stéréoscope, donne la sensation très nette du relief, et permet, à la simple inspection, d'apprécier la position du corps étranger.

La détermination de la position d'un calcul dans un viscère peut présenter un grand intérêt, là où la palpation ou l'examen optique ne laissent espérer aucune indication. Le rein et la vésicule biliaire sont dans ce cas. Les épreuves tentées sur le vivant n'ont donné aucun résultat, bien que, suivant M. O. Lodge, un écran phosphorescent s'illumine après la traversée de deux personnes adultes. En revanche, on doit à M. J. Chappuis des études préparatoires fort intéressantes sur ces recherches. Le rein est relativement opaque; il l'est sensiblement plus que le muscle, à cause de la présence de chlorures, de phosphates et d'urates dans sa masse. Mais les calculs qu'il renferme sont formés aussi de phosphates et d'urates avec de l'acide urique non disséminés comme dans le reste de l'organe. Ils sont moins perméables que l'ensemble du rein, et révèlent leur existence par une ombre bien marquée.

Il n'en est pas de même de la vésicule biliaire, qui contient diverses substances opaques, alors que ses calculs sont formés de cholestérine pure, substance relativement transparente, qui donne à l'espace occupé par le calcul l'apparence d'une cavité.

Ces recherches de M. James Chappuis ont confirmé les expériences de M. Meslans sur la transparence des substances organiques et l'opacité qu'elles acquièrent par l'addition d'une molécule inorganique.

Nous signalerons, parmi les résultats les plus remarquables obtenus jusqu'ici : la photographie admirablement nette d'un enfant nouveau-né, montrant tout le squelette et les principaux viscères; cette photographie est due au

Dr Sidney Rowland, de Londres; une épreuve semblable de M. J. Chappuis; les contours des os du thorax d'un adulte, les os parfaitement définis d'un pied engagé dans une forte chaussure, photographiés par M. Tesla; ce dernier est, du reste, parvenu à obtenir des effets extrêmement puissants à l'aide de son dispositif pour courants alternatifs. Il a produit des ombres distinctes sur des plaques photographiques placées à 12^{m} de l'appareil, et juge prudent d'enfermer dans une caisse métallique les plaques déposées à 18^{m} du tube. Il espère pouvoir prochainement décupler les effets obtenus.

Dans toutes les expériences de photographie, il convient de s'assurer toujours d'avance de l'état de la source; on aura en permanence un ampèremètre dans le circuit primaire de la bobine; avec un appareil qui ne sert pas d'une manière continue, on s'assurera, à chaque reprise du travail que la bobine fonctionne régulièrement; pour cela, on supprimera la communication avec le tube, et l'on fera éclater l'étincelle dans l'air à des distances variables. On évitera soigneusement la poussière sur tous les appareils; enfin, avant chaque nouvelle pose, on fera un essai, à l'électroscope, soit du tube sans interposition d'aucun écran, soit en interposant l'objet à photographier. On pourra, du reste, pour abréger l'essai, placer l'électroscope plus près du tube que la plaque photographique.

43. La vision directe par les écrans luminescents. — Ce procédé d'examen, un peu délaissé dans les débuts, devient de plus en plus important, à mesure que l'on connaît mieux les conditions de bon fonctionnement des récepteurs. Ces effets immédiats sont quelquefois très frappants et méritent d'être soigneusement préparés.

La plupart des écrans obtenus jusqu'ici étaient formés

d'une émulsion de platinocyanure de baryum ou de potassium étendue sur un morceau de carton, une feuille mince d'aluminium ou une plaque de verre. Dans ce dernier cas, l'émulsion doit faire face au tube. M. Hospitalier recommande d'employer le collodion de préférence à la gélatine.

Plus récemment, on a eu recours aux solutions solides étudiées par M. Wiedemann, et dont nous avons indiqué le principe (**9**). On prépare, par exemple, un écran excellent et très peu coûteux, par le procédé suivant.

On dissout une certaine quantité de tungstate de soude, dans une émulsion de gélatine ; on ajoute ensuite à la solution un léger excès de chlorure de calcium additionné d'une petite quantité de chlorure de manganèse. Il se forme alors un précipité de tungstate de calcium et de tungstate de manganèse à l'état très divisé, qui prend un vif éclat sous l'action des rayons.

Dans la construction des écrans, il ne faut pas chercher à opérer avec des sels très purifiés ; les meilleurs à ce point de vue sont souvent les plus impurs.

On trouvera, dans les solutions solides, le moyen de faire apparaître les images seulement par la chauffe de l'écran. Le support de celui-ci pourra être en mica.

CHAPITRE IX.

PHÉNOMÈNES DIVERS.

44. Action de l'effluve. — Nous avons tenu à dégager, dans ce qui précède, la découverte de M. Röntgen et les travaux auxquels elle a donné lieu directement, d'un certain nombre de faits qui semblent avoir une très grande importance, mais à propos desquels les renseignements sont insuffisants ou contradictoires, de telle sorte qu'ils sont encore impropres à corroborer une théorie.

Plusieurs observateurs, lord Blythswood, M. G. Moreau et d'autres, sont parvenus à obtenir des photographies en remplaçant le tube de Crookes par une effluve électrique produite par la décharge silencieuse d'une bobine ou d'une machine statique [1]. Ils ont ainsi cherché à relier aux découvertes récentes des faits trouvés déjà, il y a une dizaine d'années, par le docteur Boudet de Pâris et M. Tommasi, et auxquels on n'avait accordé alors qu'un intérêt de curiosité. M. Tommasi avait donné à l'agent capable d'exercer une action photographique dans une enveloppe opaque le nom de *rayons électriques ;* ce nom était évidemment mal choisi, puisqu'il a aujourd'hui une signification

[1] Lord Blythswood employait, dans ce but, une machine à 128 plateaux de 91cm, consommant plus d'un kilowatt.

bien précise; il semble cependant que, pratiquement du moins, M. Tommasi était sur la voie de la découverte de M. Röntgen.

45. La lumière noire. — Une autre découverte, qui peut avoir une importance théorique capitale, est due au docteur Gustave Le Bon; il a reconnu l'existence de radiations actiniques susceptibles de traverser des plaques métalliques épaisses, dans le flux lumineux d'une lampe à pétrole munie de son verre.

Guidé par l'idée erronée que les oscillations électriques traversent les métaux, employant un manuel opératoire qui devait conduire à de fréquents insuccès, M. Le Bon a poursuivi ses expériences avec une grande persévérance, et touchait au but lorsque parut le Mémoire de M. Röntgen. Il ne convenait pas de laisser plus longtemps inconnue une méthode qui présentait, au moins dans ses résultats, une grande analogie avec celle qu'employait le professeur de Würtzbourg. La découverte fut publiée avant d'être au point, et donna lieu à de vives discussions dont les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* contiennent tous les éléments.

Les expériences de M. G. Le Bon furent répétées par d'habiles opérateurs; M. Nodon, M. G.-H. Niewenglowski, MM. Antoine et Louis Lumière n'obtinrent aucun résultat, alors que M. Murat et le docteur Armaignac confirmaient ceux qu'avait indiqués M. Le Bon.

Le terme de *lumière noire* était évidemment mal choisi, et jetait d'emblée quelque défaveur sur la découverte. De plus, le docteur Le Bon n'en avait pas vu le facteur essentiel, et ainsi s'expliquent les résultats divers des expériences de contrôle.

Nous en trouverons tout à l'heure la raison.

46. Les rayons X et la phosphorescence. — M. Charles Henry, à qui l'on doit d'importantes recherches sur la phosphorescence, montra le premier que le sulfure de zinc, placé sur le trajet des rayons X, en augmente l'effet d'une manière assez notable.

Il devenait dès lors particulièrement intéressant de chercher à vérifier une hypothèse émise déjà par M. Poincaré, bien qu'avec une réserve prudente.

« C'est le verre qui émet les rayons Röntgen, et il les émet en devenant fluorescent. Ne peut-on alors se demander si tous les corps dont la fluorescence est suffisamment intense n'émettent pas, outre les rayons lumineux, des rayons X de Röntgen, *quelle que soit la cause de leur fluorescence?* Les phénomènes ne seraient plus alors liés à une cause électrique. Cela n'est pas très probable, mais cela est possible, et sans doute assez facile à vérifier [1]. »

La vérification a été faite par M. Niewenglowski et par M. Henri Becquerel. Le premier obtint une action sur le papier sensible lorsqu'il plaçait, sur l'enveloppe, du sulfure de calcium exposé à la lumière solaire. Le papier restait inaltéré dans les parties éloignées du corps phosphorescent.

M. Henri Becquerel employa des cristaux de sulfate double d'uranium et de potassium, et trouva aussi qu'une plaque bien enveloppée, exposée à la lumière du soleil, ne présentait des traces de réduction qu'aux endroits qui avaient pu être atteints par les rayons émanés du sel; ceux-ci se sont ainsi montrés susceptibles de traverser le papier opaque aux rayons solaires. M. Becquerel exclut l'hypothèse d'une action chimique directe en interposant, entre le sel et le papier, une mince lame de verre [2].

---

(1) *Revue générale des Sciences*, t. VII, p. 54; 30 janvier 1896.

(2) Cette action des corps phosphorescents est de nature à fausser les ex-

L'action du corps phosphorescent se prolonge, du reste, bien au delà de sa propre exposition, et même de son émission de rayons visibles. Ainsi, le corps employé par M. Becquerel perd sa lumière visible un centième de seconde après que l'exposition à la lumière excitatrice a cessé; au bout de plusieurs jours de repos, le sel phosphorescent émet des radiations traversant des lames métalliques de faible épaisseur et susceptibles d'impressionner les plaques photographiques. Bien plus, le corps, préparé dans l'obscurité, donne encore des rayons invisibles. Enfin, les radiations émanées d'un corps phosphorescent provoquent la déperdition de l'électricité.

Des constatations analogues ont été faites par M. Troost, avec du sulfure de zinc. La *fig.* 23, qui nous a été très obligeamment communiquée par M. Troost, a été obtenue par ce procédé. On avait placé, au fond d'une boîte en carton, une plaque photographique sur laquelle on avait disposé divers objets. La boîte étant fermée, on posa, sur le couvercle, un cylindre de métal fermé par une lame de verre et contenant de la blende hexagonale que l'on avait impressionnée. Les rayons, partant d'un point situé au centre du couvercle, dessinèrent, sur la plaque, l'ombre des objets suivant leur opacité [1].

Ces expériences contiennent l'explication des résultats contradictoires obtenus par les opérateurs qui ont essayé de vérifier les résultats du docteur Le Bon. Suivant M. d'Arsonval, les expériences ne réussissent que si l'on interpose, entre la source lumineuse et la plaque photo-

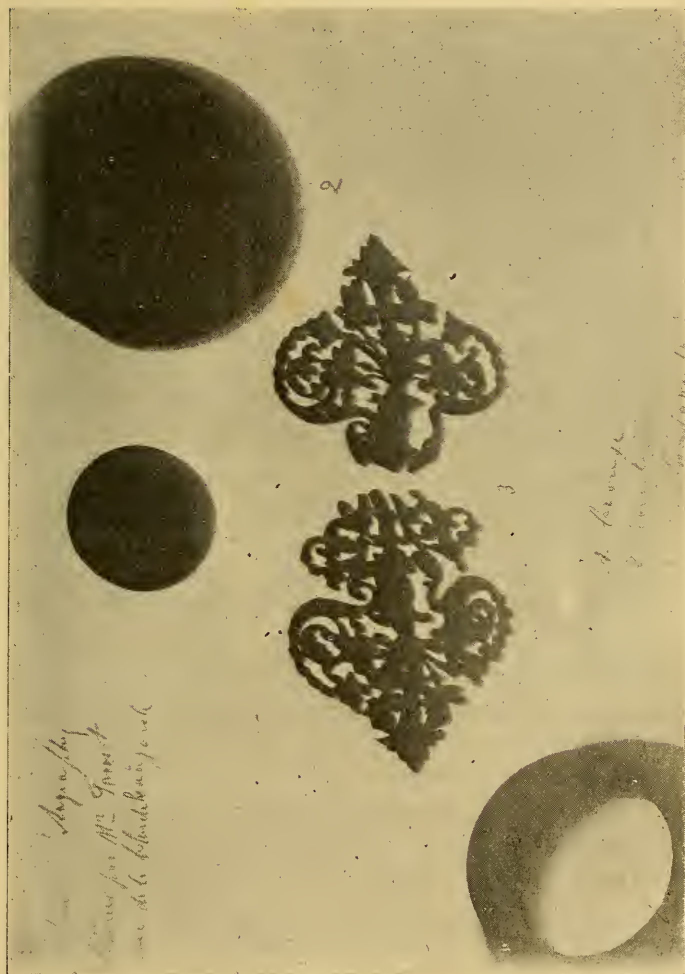
---

périences faites à l'aide de l'aluminium dont l'oxyde devient faiblement lumineux sous l'effet des rayons X (*Voir* note p. 75).

[1] M. Troost et M. Becquerel ont constaté ce fait, encore inexpliqué, que certaines substances susceptibles d'émettre les radiations nouvelles perdent très rapidement cette propriété; on la leur rendrait peut-être en les exposant à des actions électriques directes ou indirectes.

graphique, une lame de verre susceptible de donner des

Fig. 23.



rayons phosphorescents. Les verres ayant une phospho-

rescence verte ou jaune donnent en abondance de la lumière traversant les métaux; le verre d'urane est tout à fait remarquable à ce point de vue.

Les radiations émanées des corps phosphorescents ne semblent pas posséder toutes les propriétés des rayons X. Suivant M. Becquerel, ils se réfléchissent, sur les surfaces métalliques et même sur le verre, en une proportion qui n'a pas encore été déterminée, mais qui semble être assez considérable. On sait qu'ils se réfractent, mais on n'a pas de données précises sur leur indice; enfin ils se polarisent dans des tourmalines. Si nous admettons que les rayons X sont dus à des vibrations transversales très rapides, on pourrait penser, avec quelque vraisemblance, que les radiations invisibles des corps phosphorescents forment la transition entre elles et les radiations ultra-violettes ordinaires. La réflexion et la réfraction seraient une indication dans ce sens.

L'énergie de ces radiations est sans doute excessivement faible, et l'on ne pourrait pas, sans imprudence, affirmer qu'elles ne sont pas accompagnées d'un changement chimique dans les corps d'où elles émanent. La durée très longue de l'extinction, et le fait que des substances non insolées donnent naissance à ces rayons, semblent bien indiquer une transformation de cette nature (**9**).

Suivant M. Berthelot, la décomposition des sels d'argent dans la plaque est exothermique, et l'excitation a simplement le caractère d'un déclenchement; on ne demande à l'action chimique hypothétique que de donner l'équivalent de ce déclenchement, ce qui exige seulement la transformation d'une quantité de matière extrêmement faible; d'autre part, les poses employées par M. Becquerel étaient fort longues, deux ou trois jours en général, et la substance phosphorescente était au voisinage immédiat de la plaque,

de telle sorte que la moitié environ de sa radiation était utilisée.

On voit que l'idée d'une action chimique ne conduit à aucune impossibilité; cependant, si l'on découvrait, dans cette hypothèse, une contradiction quelconque, on pourrait avoir recours à une autre explication des phénomènes.

Nous avons vu que le principe de Carnot, correctement appliqué, conduit à admettre que la fluorescence peut aussi s'effectuer en sens inverse de la loi de Stokes, à la condition qu'il se produise une transformation au moins équivalente dans le sens de la loi. On ne considérera donc plus comme impossible la transformation, par un corps fluorescent, des vibrations de longue période dues à la radiation des corps obscurs environnant la substance; dans les conditions où opérait M. Becquerel, le sulfate pouvait donner tout un spectre de radiations, d'une énergie si faible que l'œil cessait de percevoir celles auxquelles il est sensible.

Dans cette idée, les phénomènes fluorescents apparaîtraient alors en Optique comme une analogie nécessaire des sons de combinaison. Le son de différence correspondrait à la radiation dégradée, seule observée jusqu'ici, tandis que le son d'addition serait le nouveau rayon actinique traversant les métaux, que le docteur Le Bon a désigné sous le nom de *lumière noire*.

Mais c'est là, avouons-le, une simple hypothèse.

APPENDICE.

EXPÉRIENCES A FAIRE.

Il serait singulièrement téméraire de chercher à tracer dès maintenant un plan de recherches pour l'avenir dans le domaine déjà minutieusement exploré par Hittorf, M. Goldstein, M. Crookes, Hertz, M. Lenard, MM. Wiedemann et Ebert, et dans lequel M. Röntgen a eu la bonne fortune de découvrir des horizons nouveaux. Les nombreuses expériences tentées depuis quelques mois ont fait entrevoir la possibilité d'expliquer les singuliers phénomènes que nous venons de décrire, mais, parmi les trois ou quatre théories possibles, aucune n'est ni nécessaire ni absurde.

Les expériences d'interférence ou de polarisation ont conduit à des résultats indécis, et il ne pouvait guère en être autrement. Des expériences négatives de ce genre ne prouvent rien, et des résultats positifs ont toujours été jusqu'ici bien voisins des erreurs d'expérience.

Une seule expérience décisive semble n'avoir jamais été tentée : la mesure de la vitesse des rayons X. Si ces rayons consistent en une vibration transversale de l'éther, il est peu probable qu'on soit avant bien des années en état de réaliser l'épreuve. La vitesse de la lumière a été mesurée surtout par deux méthodes, celle de Foucault, basée sur une réflexion, et celle de M. Fizeau, qui exige, en même temps qu'un retour vers la source, une très grande base d'expérience. Aucun de ces procédés ne convient aux rayons X.

Mais il ne s'agit pas, pour le moment, d'estimer, avec une grande approximation, une vitesse qui peut être énorme; la question se pose sous une autre forme. On aurait un bon argument de plus pour la théorie optique du phénomène si l'on parvenait à montrer que précisément cette vitesse est très grande. S'il s'agit de décider entre une vitesse de 300000 kilomètres par seconde ou une vitesse mille fois plus faible, le problème change de nature.

Nous avons vu que M. Tesla obtient déjà des effets photographiques sensibles à 12^{m} du tube et pense les augmenter beaucoup

dans l'avenir. Si l'on pouvait seulement observer d'une façon sûre les rayons à 20m ou 25m de l'appareil, on déciderait, à l'aide d'un instrument assez semblable au phosphoroscope de Becquerel, si la vitesse des rayons est trop grande pour être actuellement mesurable, ou si elle rentre dans les limites accessibles à l'expérience.

Un autre procédé pourrait sans doute être essayé. Maxwell a démontré que toute énergie vibratoire de l'éther exerce un effort sur un récepteur qui l'absorbe. Cet effort est proportionnel à l'énergie absorbée et inversement proportionnel à sa vitesse de propagation. Connaissant l'énergie et l'effort, on pourrait calculer la vitesse. Dans la théorie matérialiste, on devrait aussi percevoir un effort exercé sur le récepteur par le choc des molécules; mais il serait probablement d'un autre ordre de grandeur que l'effort dû à l'absorption de l'énergie vibratoire.

Nous avons décrit les expériences tentées par M. E. Wiedemann pour étudier la radiation à l'intérieur de l'ampoule. Les expériences de cette nature présentent un très grand intérêt, parce qu'elles permettent de saisir la radiation avant que les parois du verre en aient absorbé la majeure partie. Nous avons dit que l'on trouverait probablement dans le tube un spectre très complet, débutant peut-être dans le spectre visible et dans le commencement de l'ultra-violet par quelques bandes séparées. Le procédé des écrans à bande d'absorption, que l'on superposerait au besoin, rendrait cette méthode d'un maniement facile. On trouve, dans les Mémoires récents de M. E. Wiedemann, l'indication d'un grand nombre de mélanges de sels sensibles à des radiations diverses. Certaines substances étudiées par M. Wiedemann sont excitées par des rayons traversant le spath fluor, et dont la longueur d'onde est de $0^{\mu},1$, d'autres ne deviennent lumineuses que sous l'action de radiations plus courtes. On se servira avec avantage d'ampoules à foyer de métal transformant complètement la radiation, et l'on devra masquer la radiation directe de la cathode.

Nous avons vu que la théorie de la décharge des corps électrisés sous l'action des rayons X n'est pas encore fixée.

Suivant MM. Lenard et Wolf, l'action de la lumière ultra-violette réside dans une pulvérisation du métal qui provoque la convection des charges. MM. Benoist et Hurmuzescu pensent, au contraire, que les gaz occlus dans le métal prennent seuls part à cette convection, peut-être avec un peu d'arrachement du métal, comme l'a indiqué, il y a quelques années, M. Berliner. On séparera probablement ces deux idées par l'étude de l'action du milieu, et par la recherche de l'influence exercée sur le phénomène par la fréquence

des impulsions. La théorie de l'ionisation, entièrement différente des premières, peut être défendue par de bons arguments. Nous avons exposé parallèlement ces deux idées, sans trouver un argument décisif ni pour l'une ni pour l'autre. Remarquons que les expériences de MM. Lenard et Wolf s'accorderaient également bien avec la théorie qu'ils en ont donnée, avec celle de MM. Benoist et Hurmuzescu, et avec l'idée de l'ionisation défendue par M. J.-J. Thomson. On sait, en effet, que les ions peuvent aussi devenir des centres de condensation de la vapeur d'eau, et l'on a même fondé sur cette idée une théorie de la formation des nuages, l'air étant ionisé par les radiations ultra-violettes du soleil.

MM. Percy Frankland et Mac Gregor décrivent une expérience qui leur paraît opposée à l'idée de l'ionisation. Un corps optiquement actif est dissous dans un liquide qui le dissocie partiellement; il doit donc s'y trouver dans un état tel que la moindre cause additionnelle d'ionisation doit produire une action sensible.

Cependant, les auteurs n'ont observé aucune modification dans le pouvoir rotatoire de la solution, même après une action prolongée des rayons X.

On voit que la question est très complexe; mais elle a des conséquences si importantes pour la philosophie naturelle qu'il vaut la peine de lui consacrer de grands efforts.

M. Becquerel, à l'exemple de M. H. Dufour, pense pouvoir attribuer à une effluve électrique certains effets des corps phosphorescents. Le défaut de polarité ne nous semble pas d'accord avec cette idée.

Nous avons essayé de ramener les effets singuliers découverts par M. Becquerel à l'idée générale de la fluorescence. Nous ne considérons nullement cette idée comme probable; il nous a seulement paru intéressant de montrer qu'elle n'est pas absurde. Dans le mode de raisonnement que nous avons adopté, presque tous les arguments que l'on peut trouver en faveur de l'idée d'une phosphorescence s'appliquent aussi bien à la fluorescence. Il semble cependant que, dans les deux cas, l'action de la température pourrait être différente; surtout, l'action de la variation de la température serait tout autre. Dans la théorie de la fluorescence, le corps devrait atteindre immédiatement l'état définitif; il n'en serait pas de même pour une phosphorescence, mais la faiblesse de l'action rend cette idée bien difficile à vérifier.





IMAGE RADIOGRAPHIQUE D'UNE GRENOUILLE.

Épreuve de MM. Imbert et Bertin-Sans.

Pl. VIII.



RADIOGRAPHIE D'UN PIGEON OBTENUE AU MOYEN D'UN TUBE A FOYER DE PLATINE.

Épreuve de M. V. Chabaud.

EXPLICATION DES PLANCHES.

Planche I. — Profil des os de la main; radiographie faite par M. Londe, dans le but de déterminer la position d'une balle logée entre les métacarpiens. (*Voir* p. 123).

Cette épreuve date des débuts de la méthode; elle a été obtenue avec une pose assez longue, mais aujourd'hui, on arriverait au même but avec une pose de trois secondes pour une main d'adulte, et de deux secondes seulement pour une main d'enfant.

Les poses les plus longues permettent de traverser complètement les os, comme le montre la planche suivante.

Planche II. — Épreuve de M. J. Chappuis, obtenue à l'aide d'un tube à foyer de platine. Les chairs ont complètement disparu, et les os, au lieu de donner une ombre noire comme dans les radiographies du début, montrent bien nettement des différences d'opacité, dues soit à des épaisseurs variables, soit surtout à la teneur en phosphate de chaux. La bague a porté une ombre absolument noire, qui se détache sur les parties voisines de l'os. Celui-ci, même dans ses régions les plus dures, n'a pas arrêté complètement les rayons.

Planche III. — Nous avons réuni, sur la même planche, deux épreuves qui offrent un remarquable contraste. La première a été obtenue en soumettant un œuf de poule, pendant un temps prolongé, à l'action des rayons émanés d'un tube à foyer de platine.

L'œuf avait été couvé pendant dix-neuf jours, et contenait un poussin prêt à éclore. La coquille de l'œuf est semi-transparente à la lumière ordinaire, et il ne semble pas, à première vue, très difficile d'obtenir une image radiographique de son contenu; cependant, la radiographie du poussin dans l'œuf est l'une des plus difficiles à réussir. Le carbonate de chaux, dont la coquille est formée, oppose aux rayons X une résistance très considérable, alors que

les os du poussin, encore très gélatineux, sont aisément traversés. Cet essai, que M. J. Chappuis a très obligeamment tenté à notre demande, nous porte à croire que l'on obtiendrait avec plus de facilité l'image de l'œuf dans la poule que celle du poussin dans l'œuf.

La seconde figure de la même planche nous montre, par contraste, l'un des cas où la méthode est le plus efficace. Elle représente un portefeuille fermé, contenant un lorgnon, un crayon passé dans sa gaine de cuir, une lancette, des aiguilles, et d'autres objets métalliques. Le cuir du portefeuille, entièrement organique, a presque complètement disparu; il en est de même du bois du crayon, tandis que la plombagine, rendue plus opaque par l'argile mélangé au graphite, se détache en gris sur le fond. L'admirable netteté de l'image permet de voir que la plombagine présente une solution de continuité.

Le verre du lorgnon s'est révélé relativement opaque, tandis que le manche de la lancette, en écaille, est presque invisible.

Cette épreuve nous a été communiquée par M. E. Colardeau; elle a été obtenue à l'aide de son tube spécial décrit à la page 115, *fig.* 18.

Planche IV. — Cette image, que nous devons à l'obligeance de M. Albert Londe, date, comme celle de la *Pl. I*, des débuts des recherches; elle représente une boîte avec son contenu; malgré la grande épaisseur traversée, les détails ont conservé une netteté suffisante pour permettre de reconnaître immédiatement toutes les pièces métalliques de l'ensemble : le bracelet enfermé dans la boîte, et les petits clous qui la maintiennent.

Planches V et VI. — Ces deux planches représentent un rat d'égout, radiographié et photographié par les procédés ordinaires afin de faciliter la comparaison. La fourrure de l'animal a complètement disparu, ainsi que sa peau, comme on le voit bien distinctement sur la queue dont les osselets sont seuls apparents sur la radiographie. La colonne vertébrale est nette ainsi que les côtes. On voit apparaître les viscères et les masses musculaires les plus importantes; ces deux épreuves nous ont été très obligeamment communiquées par M. Albert Londe.

Planche VII. — Grenouille, radiographiée par MM. Imbert et Bertin-Sans.

Planche VIII. — Pigeon obtenu par M. V. Chabaud, au moyen d'un tube à foyer de platine.

Ces deux dernières images offrent en quelque sorte un contraste;

la grenouille, relativement transparente et plate, n'a donné que des ombres légères; ses os eux-mêmes se sont marqués en gris, et sont sensiblement plus pâles que les épingles piquées en divers endroits de l'animal pour le maintenir en place. On voit, par l'ombre élargie de l'extrémité des épingles, que le foyer possédait une certaine étendue; les tubes de construction récente donneraient une netteté plus grande. Les masses musculaires superposées se distinguent par une légère augmentation de l'opacité; au contraire, les poumons marquent une tache blanche dans le thorax.

On peut, en revanche, obtenir l'ombre très noire des viscères au moyen d'une injection de mercure.

La *Pl. VIII* nous montre un cas tout opposé; l'animal offre de grandes épaisseurs et possède une assez forte opacité. Toutefois, l'épreuve originale, rendue moins nette par la reproduction, permet de distinguer tous les viscères; les côtes se détachent par un léger renforcement de l'ombre sur le fond déjà foncé que forment les poumons, le cœur et les masses musculaires attachées au sternum. Dans les parties moins épaisses, les chairs ont complètement disparu; ainsi, les ailes et les pattes ne montrent que l'os, dont on peut remarquer la parfaite netteté. On voit que l'ombre des os va en s'assombrissant du milieu vers les bords; on reconnait ainsi qu'ils sont tubulaires.

Avec des poses plus ou moins longues, on ferait apparaître à volonté l'une ou l'autre des parties de l'animal. Une exposition très courte donnerait la plume et les muscles; puis on verrait apparaître les os des ailes et des cuisses; en prolongeant encore, on obtiendrait les viscères comme dans l'épreuve de M. Chabaud; enfin, avec une pose encore plus longue, on ferait disparaître toutes les parties minces, pour ne conserver que le corps de l'animal, avec ses plus grandes opacités.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE I.

L'état gazeux.

CHAPITRE II.

La lumière.

CHAPITRE III.

L'électrolyse.

SECONDE PARTIE.

CHAPITRE IV.

Les décharges dans les gaz, première période.

CHAPITRE V.

Les décharges dans les gaz, deuxième période.

CHAPITRE VI.

Les rayons X.

CHAPITRE VII.

Essai de théorie.

CHAPITRE VIII.

Applications.

CHAPITRE IX.

Phénoménes divers.

APPENDICE.

PLANCHES.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

5305 B. — Paris, Imp. Gauthier-Villars et fils, 55, quai des Gr.-Augustins.